



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA



ESTUDO E INOVAÇÃO DE CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS EM ATMOSFERA EXPLOSIVA VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Andrey Oliveira de Souza

Campina Grande – PB

Mai de 2016

ESTUDO E INOVAÇÃO EM CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS DE ATMOSFERA EXPLOSIVA VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Andrey Oliveira de Souza

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientadores:

Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Campina Grande – PB

Mai de 2016

ESTUDO E INOVAÇÃO EM CLASSIFICAÇÃO DE ÁREAS DE ATMOSFERA EXPLOSIVA VIA FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

Andrey Oliveira de Souza

Tese apresentada em ___/___/_____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Antonio Tavernard Pereira Neto

Orientador – UAEQ – UFCG

Prof. Dr. José Jaílson Nicácio Alves

Orientador – UAEQ – UFCG

Prof. Dr. Antônio Carlos Brandão de Araújo

Examinador Interno – UAEQ – UFCG

Prof. Dr. Heleno Bispo da Silva Júnior

Examinador Interno – UAEQ – UFCG

Prof. Dr. Antonio Gilson Barbosa de Lima

Examinador Externo – UAEM – UFCG

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira

Examinador Externo - UEPB

DEDICATÓRIA

Ao meu tão amado pai, Adinécio Nascimento de Souza, que sempre foi fonte de inspiração, amigo, companheiro, minha referência, aquele que sempre foi e sempre será, também em memória, um grande motivo para que eu faça por onde sempre orgulhá-lo e bem representá-lo, dando continuidade à sua boa obra nessa vida, dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente, principalmente e imensamente a Deus por sua infinita misericórdia e inúmeras bênçãos derramadas incessantemente sobre mim, sem O qual nada eu seria e nada eu teria conquistado nessa vida.

Agradeço aos meus pais: Adinécio Nascimento de Souza e Germana de Oliveira Souza, e irmãos: Adinécio Oliveira de Souza e Adrienne Oliveira de Souza; que em bela expressão de amor incondicional, sempre se envolveram, torceram, se preocuparam, acreditaram, incentivaram, apoiaram nas horas mais difíceis e não mediram esforços para dar todas as condições que dispunham para que nada impedisse o alcance de meus objetivos.

Agradeço a minha esposa, Lívia Jorge de Sousa e filhas: Alice Jorge de Oliveira Souza e Anita Jorge de Oliveira Souza; que sempre me dedicaram carinho, amor, companhia, alegria, compreensão, parceria e constante apoio, sendo sempre o compromisso que assumo com prazer e o combustível que me impulsiona.

Ao meu grande amigo de longa data, Antonio Tavernard Pereira Neto, pelo desprendimento e paciência em me ajudar no desenvolvimento deste trabalho, além do grande apoio e amizade que sempre me dispensou.

À José Jaílson Nicácio Alves, por sempre ter confiado e aceitado me orientar em diversos trabalhos, desde a graduação e ao longo de toda minha vida acadêmica.

Aos professores da UAEQ da Universidade Federal de Campina Grande pelo conhecimento que me foi passado, em especial, ao professor Antônio Carlos Brandão, pela oportunidade de aprendizado e convivência agregadora.

Aos nobres amigos, Heleno Bispo da Silva Júnior, José Nilton da Silva e Sidinei Kleber da Silva, que sempre se fizeram presentes de forma bastante positiva e inspiradora nessa caminhada, tanto no campo profissional, como no campo pessoal, sendo, para mim, ao mesmo tempo parceiros e referências em todos os cenários da vida cotidiana.

A todos os integrantes do LENP (Laboratório de Experimentação Numérica de Processos) pela acolhida sempre amistosa, em especial a Talles Caio Linhares de Oliveira e Hiuquem Monteiro Lopes, pela parceria e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

A todos meus amigos-irmãos, pelo apoio irrestrito, torcida constante, tolerância, respeito, amor gratuito e amizade fiel. Verdadeira essência de amizade que muito me orgulha e que se fortalece a cada ano que passa.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia do Sertão Pernambucano, em especial à Coordenação do curso Técnico em Química do *campus* Petrolina, pelo apoio e oportunidade a mim concedida para esta capacitação profissional.

“A tarefa não é tanto ver aquilo
que ninguém viu, mas pensar o
que ninguém ainda pensou sobre
aquilo que todo mundo vê.”

Arthur Schopenhauer

RESUMO

Há muitos anos o risco de explosão e consequentes requisitos legais para classificação de áreas tem sido uma preocupação mundial. A norma brasileira para classificação de área de atmosfera explosiva é uma tradução fiel da norma internacional (IEC 60079-10-1). Diversos autores defendem que os critérios aplicados por esta norma não tem base científica, podendo levar a erros por excesso, ou mesmo a uma falsa impressão de segurança. Portanto, o presente trabalho teve por objetivo desenvolver uma alternativa confiável para classificação de área. Para tanto, foi desenvolvido modelo CFD, através do *software* ANSYS CFX 16.1, validado e parametrizado para ter aplicação possível em ampla faixa de condições de vazamento sônico. Para definir condições de vazamento aleatórias a serem simuladas, utilizou-se a técnica estatística de amostragem multidimensional do Latin Hipercubo, variando-se pressão e temperatura do reservatório, diâmetro do orifício, propriedades dos gases e direção do vazamento em relação à gravidade e vento. Os resultados mostram que o domínio de cálculo deve ser parametrizado em 8 metros de comprimento para cada milímetro de diâmetro da fonte de liberação. A malha deve ser parametrizada com 50 elementos ao longo do diâmetro do orifício, mantendo-se a estrutura hexaédrica em todo o domínio. A gravidade mostrou-se não interferir nos resultados de extensão e volume de atmosfera explosiva em vazamentos sônicos. O desvio de idealidade nas condições do reservatório, previsto pela aplicação da equação de Soave Redlich Kwong, também não influenciou significativamente a previsão de extensão e volume de atmosfera explosiva. A análise das simulações de condições de vazamentos aleatórias permitiu o desenvolvimento de equação integral simples e prática para determinação confiável de extensão de atmosfera explosiva. A consideração da direção do vento nas simulações demonstra que o volume da atmosfera explosiva não estar diretamente relacionado à sua extensão. Por fim, a relação entre o volume hipotético da atmosfera explosiva e seu alcance é aplicada como critério para definir risco de ignição em uma proposta de classificação de área mais confiável, que leve em consideração os efeitos de dispersão.

Palavras-chave: Classificação de Área; Atmosfera Explosiva, CFD.

ABSTRACT

For many years the risk of explosion and consequent legal requirements for area classification has been a global concern. The Brazilian standard for area classification by explosive atmospheres is a faithful translation of the international standard. Many authors defend that these standard has not a scientific basis, what can causes many mistakes, because of excess or a false impression of safety. Therefore, the present work has as objective to develop a reliable alternative to area classification. For that, was developed a CFD model, by *software* ANSYS CFX 16.1, validated and parameterized to a great interval of sonic leak. To set random leak conditions to be simulated, it was used a statistical technique of multidimensional sampling (Latin Hipercubo), varying pressure and temperature of reservoir, orifice diameter, gas properties and leak direction relative to gravity and wind. The results show that the calculation domain should be parameterized in 8 meters length for millimeter in diameter from the source of release. The mesh must be parameterized in elements 50 along the hole diameter, while maintaining the hexahedral structure throughout the domain. Gravity proved not interfere in the extension and volume results of explosive atmosphere in sonic leaks. The deviation from ideality at reservoir conditions observed by applying the equation of Soave Redlich Kwong also not significantly influenced the extension and volume of explosive atmosphere. The analysis of simulations of random leaks conditions allowed the development of simple and practical integral equation for reliable determination of explosive atmosphere extension. Consideration of wind direction in the simulations show that the volume of the explosive atmosphere could not be directly related to its length. Finally, the relationship between the hypothetical volume of explosive atmosphere and its extension is applied as a criterion to define the risk of ignition in a proposal for a more reliable area classification, which takes into account the effects of dispersion.

Keywords: Area classification; Explosive atmosphere; CFD.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1: Barril na saída do orifício para escoamento obstruído | 24 |
| Figura 2.2: Esquema de vazamento para o ambiente através de um orifício | 26 |
| Figura 2.3: Jato cônico | 29 |
| Figura 2.4: Diagrama representativo da emissão gasosa sônica | 30 |
| Figura 2.5: Exemplo ilustrativo de classificação de área em zonas | 35 |
| Figura 2.6: Nuvem com concentração C_{crit} e volume V_z | 37 |
| Figura 2.7: Volume hipotético V_z | 39 |
| Figura 4.1: Esquema do domínio de cálculo | 50 |
| Figura 4.2: Geometria do domínio de cálculo (destaque para orifício) | 51 |
| Figura 4.3: Esquema de uma fatia representativa do ambiente externo | 51 |
| Figura 4.4: Definição da geometria (detalhe para região da fonte de emissão) | 52 |
| Figura 4.5: Parametrização do comprimento do ambiente externo | 53 |
| Figura 4.6: Parametrização do domínio em relação ao diâmetro do orifício | 53 |
| Figura 4.7: Estrutura da malha 3D do domínio de cálculo | 54 |
| Figura 4.8: Estrutura da malha 3D na região do orifício | 55 |
| Figura 4.9: Estrutura da malha (detalhe para região de liberação do gás) | 56 |
| Figura 4.10: Parametrização da malha | 57 |
| Figura 4.11: Domínio e indicação dos contornos | 58 |
| Figura 4.12: Parâmetros de entrada do modelo | 60 |
| Figura 4.13: Fluxograma do processo de parametrização do modelo CFD | 65 |
| Figura 5.1: Análise de sensibilidade local para vazamento de metano | 69 |
| Figura 5.2: Definição do comprimento do domínio, a partir de vazamento de H_2 a 100 bar, 303,15 K e diâmetro do orifício igual a 2,5 mm | 69 |
| Figura 5.3: Número de Mach no orifício para vazamento de metano a partir de pressão e temperatura do reservatório de 100 bar e 323,15K, respectivamente | 73 |
| Figura 5.4: Perfil de Pressão na região próximo à liberação do gás | 75 |
| Figura 5.5: Perfil de Temperatura na região próximo à liberação do gás | 75 |
| Figura 5.6: Perfil de densidade na região próximo à liberação do gás | 76 |
| Figura 5.7: Perfil de velocidade na região próximo à liberação do gás | 76 |
| Figura 5.8: Campo de Velocidade no Barril (Número de Mach) para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm | 77 |
| Figura 5.9: Campo de Temperatura no Barril para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm | 78 |
| Figura 5.10: Campo de Concentração do gás no Barril (Fração Molar do gás) para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm | 78 |
| Figura 5.11: Comportamento do gás próximo ao orifício | 79 |
| Figura 5.12: Validação do resultado CFD com base em dados experimentais de vazamento de gás natural (92,4% de metano) | 82 |
| Figura 5.13: Validação do resultado CFD com base em dados experimentais de vazamento de etileno | 83 |
| Figura 5.14: Variação da extensão de atmosfera explosiva de metano com a pressão e temperatura do reservatório | 85 |
| Figura 5.15: Variação da Extensão de atmosfera explosiva de metano com o diâmetro do orifício | 85 |
| Figura 5.16: Previsão de dispersão a partir de alta temperatura no reservatório | 86 |

| | |
|--|-----|
| Figura 5.17: Variação da Extensão com a taxa de liberação de metano – 100 casos de vazamento de metano | 87 |
| Figura 5.18: Extensão para diferentes frações molares de metano | 88 |
| Figura 5.19: Variação da extensão com a massa molar | 89 |
| Figura 5.20: Extensões no LIE de diferentes gases | 92 |
| Figura 5.21: Reprodução do resultado CFD pela equação empírica | 93 |
| Figura 5.22: Influência do vento na extensão da nuvem de metano..... | 98 |
| Figura 5.23: Influência do vento no volume da nuvem de metano | 98 |
| Figura 5.24: Influência do vento cruzado na forma da nuvem de metano | 99 |
| Figura 5.25: Forma da Nuvem representativa da atmosfera explosiva | 100 |
| Figura 5.26: Relação volume-extensão da nuvem de metano..... | 103 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 2.1: Guia normativo para Classificação de Área..... | 40 |
| Tabela 4.1: Variáveis e parâmetros do modelo Fluidodinâmico. | 48 |
| Tabela 4.2: Intervalo dos parâmetros de entrada nas simulações em CFD | 61 |
| Tabela 4.3: Condições de vazamento em relação à gravidade e ao vento..... | 62 |
| Tabela 5.1: Influência do comprimento do domínio | 68 |
| Tabela 5.2: Influência do refinamento da malha | 71 |
| Tabela 5.3: Influência da equação de estado na previsão da extensão de ATEX..... | 72 |
| Tabela 5.4: Influência da gravidade na extensão e volume da nuvem de metano | 96 |
| Tabela 5.5: Proposta de Classificação de Área alternativa..... | 104 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| Capítulo 1 | 15 |
| 1 Introdução..... | 15 |
| 1.1 Problematização | 16 |
| 1.2 Justificativa | 18 |
| 1.3 Objetivos | 19 |
| 1.3.1 Geral..... | 19 |
| 1.3.2 Específicos..... | 19 |
| 1.4 Estrutura da Tese | 20 |
| 1.5 Contribuição da Tese | 21 |
| Capítulo 2 | 22 |
| 2 Fundamentação Teórica..... | 22 |
| 2.1 Comportamento e Estrutura do Jato Sub expandido..... | 23 |
| 2.2 Modelagem Fenomenológica da taxa de emissão gasosa a partir de altas pressões de estagnação | 25 |
| 2.3 Previsão da dispersão gasosa..... | 28 |
| 2.4 Classificação de Área – Atmosferas explosivas de gás..... | 34 |
| Capítulo 3 | 42 |
| 3 Revisão Bibliográfica..... | 42 |
| Capítulo 4 | 47 |
| 4 Metodologia..... | 47 |
| 4.1 Simulação em CFD da dispersão gasosa | 48 |
| 4.2 Parametrização da Geometria | 49 |
| 4.3 Parametrização da Malha..... | 54 |
| 4.4 Parametrização do Modelo..... | 58 |
| 4.5 Estudo da influência dos parâmetros de entrada..... | 60 |
| 4.6 Análise dos resultados – Parâmetros de saída | 63 |
| Capítulo 5 | 66 |
| 5 Resultados e Discussões | 66 |
| 5.1 Influência do comprimento do domínio..... | 67 |
| 5.2 Influência do refinamento da malha | 70 |
| 5.3 Análise do modelo | 72 |
| 5.4 Previsão da estrutura do jato na região da emissão..... | 77 |
| 5.5 Validação do modelo CFD..... | 82 |
| 5.6 Influência das condições de vazamento na extensão de áreas classificadas..... | 84 |

| | | |
|----------------------------|--|-----|
| 5.7 | Influência da direção do vazamento na forma da nuvem de atmosfera explosiva..... | 94 |
| 5.8 | Proposta de método para classificação de área | 102 |
| 5.9 | Aplicação de método alternativo para classificação de área..... | 105 |
| Capítulo 6 | | 110 |
| 6 | Conclusão..... | 110 |
| 6.1 | Considerações Finais..... | 111 |
| 6.2 | Sugestões de trabalhos futuros | 112 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | | 113 |
| APÊNDICE | | 117 |

Capítulo 1

Introdução

1.1 Problematização

Substâncias inflamáveis são manipuladas ou estocadas nos mais diversos setores e processos, como na agricultura e nas indústrias têxtil, química, de reciclagem, de energia por biomassa, petroquímicas, etc. Tais indústrias são projetadas, operadas e mantidas para prevenir o vazamento dessas substâncias e limitar a dimensão das áreas perigosas (MIRANDA, 2013).

Essas substâncias inflamáveis podem dá origem a uma região considerada atmosfera explosiva. Para tanto, o potencial vazamento dessas substâncias deve ser considerado, de forma que medidas de segurança sejam tomadas de acordo com a classificação de área estabelecida pela norma brasileira (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009). A partir desta classificação, por exemplo, se faz a adequada seleção de equipamentos a serem utilizados com segurança em tais ambientes.

Desta forma, em situações onde exista uma alta probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva de gás, a confiabilidade é obtida pela utilização de equipamentos que possuam uma baixa probabilidade de se tornarem fontes de ignição (equipamentos mais caros, identificados com o logotipo “EX”). Por outro lado, onde houver uma baixa probabilidade de ocorrência de uma atmosfera explosiva de gás, equipamentos construídos com requisitos menos rigorosos podem ser utilizados (envolvendo menores custos) (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009). Assim, a avaliação de risco e o seu controle constituem não só um requisito legal, mas também um fator crítico para o sucesso do negócio (OTSUKA, 2012).

Por tais razões, há muitos anos, o risco de explosão e consequente requisito para classificação de áreas tem sido uma preocupação mundial. O padrão americano utiliza as normas API 500, API 505 e a NFPA 497, todas com um caráter prescritivo. Já o padrão europeu faz uso da norma IEC 60079-10-1 para classificação de áreas de atmosfera explosiva, utilizando para tanto um método analítico para este propósito (THOMMASINI, 2013).

Segundo Thommasini (2013), a norma americana envolve menos cálculos e é fácil de ser usada, no entanto leva a estimativa de grandes extensões de

área classificada, em relação à norma europeia. O autor destaca que essa grande extensão pode causar custos elevados na instalação de equipamentos elétricos requeridos para oferecerem baixa probabilidade de ignição (tipo EX) em regiões que talvez não fossem necessários.

Em relação à norma europeia (IEC 60079-10-1), não há justificativa científica para as fórmulas usadas na determinação do volume da nuvem de gás no ambiente (WEBBER, 2011). Valor este usado como referência para classificar a área, a partir do qual se estima a ventilação local comparando-se ao volume disponível do ambiente (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009).

Em se tratando da extensão da área a ser classificada, mesmo a norma europeia (IEC 60079-10-1) faz uso genérico de métodos de classificação de áreas por figuras padronizadas ou pré-definidas. Por não ter a devida justificativa técnica, o uso deste guia normativo é questionado por vários autores e profissionais especializados no assunto, por considerarem que pode causar distorções na análise do risco (OTSUKA, 2012).

O vazamento acidental de gases inflamáveis a partir de sistemas altamente pressurizados pode levar a formação de jatos de metros de comprimento. Entender e prever o comportamento do jato é uma etapa essencial para uma análise segura desses tipos de sistemas (PAPANIKOLAOU, 2012).

A utilização de figuras padronizadas pode induzir a erros por excesso, ou mesmo levar a uma falsa impressão de segurança, pois dar margem a interpretação errônea, incorrendo em situação de risco (JORDÃO, 2002). A própria norma sugere que o guia normativo seja padronizado. (ABNT NBR IEC 60070-10-1:2009, anexo C, pág. 38)

Assim, atualmente a simulação e análise de resultados oriundos de modelos gerados por técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD), se mostram uma alternativa mais confiável que os modelos prescritivos ou que utilizam apenas equações algébricas simplificadas. Nestes modelos, as equações governantes de massa, momento e energia, bem como os modelos de turbulência são resolvidos em volumes de controle no espaço e no tempo (OTSUKA, 2012).

1.2 Justificativa

Dado a pouca cientificidade da norma, somado aos consequentes custos envolvidos na classificação de área e a suposta margem de segurança garantida apenas por julgamento de engenharia, Erthal (2004) defende a necessidade de desenvolvimento de estudos em Áreas Classificadas.

Trabalhos como o de Ivings (2008) mostra a partir de resultados obtidos com o uso do CFD, que o volume da atmosfera explosiva calculada pela expressão presente na norma IEC 60079-10, é superestimada em duas ou três ordens de magnitude. Webber (2011) complementa, indicando que o uso de modelos a partir do método CFD fornece caráter científico à atividade de classificação de área.

Miranda (2013) também corrobora, defendendo que o método CFD é mais completo e realístico, pois levam em conta o fenômeno de turbulência e demais outras condições iniciais e de contorno. O referido autor ainda defende que a validade das equações simplificadas são limitadas aos casos em que a diluição do gás até o seu limite inferior de explosividade é perfeita, o que não pode ser garantido em qualquer faixa de condições de vazamento.

Por fim, a própria norma (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009, Anexo B, seção B.5.2, pág. 24) deixa claro que os cálculos apresentados para estimativa do volume hipotético (V_2) não são destinados a serem considerados como o único método de avaliação. Outras formas de avaliação, tal como, por exemplo, via modelagem computacional, podem também ser adequado.

Desta forma, justifica-se a aplicação de técnicas de fluidodinâmica computacional (CFD) como via para obtenção de confiabilidade e intervenção necessária na atividade de classificação de área.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Avaliar e classificar áreas de risco devido atmosfera explosiva, com maior confiabilidade, a partir do desenvolvimento de técnicas de fluidodinâmica computacional, aplicada a uma ampla faixa de condição de vazamento sônico de gases inflamáveis em ambiente aberto.

1.3.2 Específicos

- a) Aplicar técnica CFD para simulação de emissão sônica de gases inflamáveis, validada por dados experimentais encontrados na literatura;
- b) Parametrizar simulação em CFD para automatização e viabilização de grande número de simulações, que envolva grande intervalo de condições de vazamento e retorne as respostas de interesse;
- c) Analisar as influências das variáveis de processo no tamanho da atmosfera explosiva (pressão, temperatura, diâmetro do orifício e propriedades de gases genéricos);
- d) Propor equação empírica, validada por resultados CFD, a ser utilizada de maneira prática e confiável, para estimar extensão de área classificada, dispensando futuro esforços computacionais para este fim;
- e) Verificar a influência da direção do vazamento em relação à gravidade e ao vento, na extensão, volume e forma da pluma representativa da atmosfera explosiva.
- f) Propor classificação de área que leve em consideração a extensão, forma e volume da nuvem representativa da atmosfera explosiva, comparando com a proposta do padrão normativo.

1.4 Estrutura da Tese

O presente trabalho é dividido em capítulos. Este primeiro capítulo apresenta a problematização que motivou à pesquisa acerca do tema escolhido, bem como as justificativas e objetivos para o desenvolvimento proposto.

O segundo capítulo traz a fundamentação teórica. Neste capítulo é abordado o pressuposto teórico e conceitos fundamentais, aplicáveis e necessários para entendimento do fenômeno de dispersão a partir de emissão sônica. A atividade normativa de classificação de área perigosa também é abordada neste capítulo.

No terceiro capítulo é explorado a revisão bibliográfica. Neste capítulo é apresentado trabalhos recentes em torno do tema de classificação de área perigosa por atmosfera explosiva que envolvem o uso de técnicas CFD para este fim.

No quarto capítulo é apresentada a metodologia. Neste capítulo é detalhado a técnica utilizada para definição e parametrização das simulações em CFD, bem como o percurso metodológico para definição de uma proposta de classificação de área mais confiável.

A análise das investigações e a proposta de metodologia alternativa, seguida de comparação da metodologia proposta com o que prevê o padrão normativo é encontrado no capítulo 5. Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as considerações finais, bem como a sugestão de trabalhos futuros.

1.5 Contribuição da Tese

Uma operação segura, a partir de uma classificação de área de risco de explosão não é apenas um requisito de segurança, mas também um requisito legal que envolve custos com equipamentos. Porém, como destaca Macmillan (1998), a determinação confiável da extensão da área classificada é alvo de bastante discussão, sendo reconhecidamente uma difícil área da tecnologia.

Assim uma classificação de área perigosa com base científica, se presta a oferecer uma via para agregar segurança. Desta maneira, fomenta-se a redução do risco de classificação de áreas não justificadas ou potencialmente insuficientes, bem como evita-se custos possivelmente desnecessários.

A norma brasileira para classificação de área de atmosfera explosiva é uma tradução da norma internacional IEC 60079-10:1, aplicada em diversos países europeus. Esta, além de ser reconhecidamente bastante conservadora e não ter base científica (como já exposto), parte do pressuposto que a ventilação reduz o volume e extensão da atmosfera explosiva, sem levar em consideração a direção do vento. Além disso, os modelos desenvolvidos em outros trabalhos recentes, relacionados ao tema (IVING, 2008, WEBBER, 2011, SANTON, 2012, TOMMASINI *etal.*, 2013, MIRANDA, 2013), não consideram o efeito da direção do vento na extensão, volume e forma da pluma gerada por emissão sônica, o que neste trabalho é defendido que interfere na probabilidade de ignição. O estudo desse efeito tem sua análise viabilizada via CFD.

Por fim, o desenvolvimento de modelo CFD parametrizado oferece a vantagem de considerar-se, com confiabilidade, um maior universo de possibilidades, na atividade de classificação de área de atmosfera explosiva. Este modelo parametrizado associado à aplicação da técnica estatística LATIN HIPERCUBO, viabiliza investigar com praticidade respostas de interesses de inúmeras condições de vazamento aleatórias. Com os resultados dessas análises viabiliza-se a proposta de uma equação prática que dispense o esforço computacional em futuras determinações de extensão de atmosfera explosiva.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Para efeito de referencial teórico, em que a pesquisa será baseada, a teoria e os modelos de dispersão gasosa, aplicáveis às emissões sob altas pressões, e os conceitos fundamentais acerca dos procedimentos para classificação de área perigosa, serão abordados nos sub tópicos que seguem.

2.1 Comportamento e Estrutura do Jato Sub expandido

A previsão do perfil de concentração produzido por escoamento turbulento de jato subsônico incompressível, através de modelos unidimensionais, é bem documentado na literatura (WILSON e DANKWERTS, 1964; BECKER *et al.*, 1967; WYGNANSKY e FIEDLER, 1969; ANTONIA *et al.*, 1975; SHAUGHNESSY e MORTON, 1977; citados por BIRCH *et al.*, 1984). Estes trabalhos demonstram que o perfil de concentração não depende da velocidade do jato (BIRCH *et al.*, 1978; BIRCH *et al.*, 1979, citados por BIRCH, 1984).

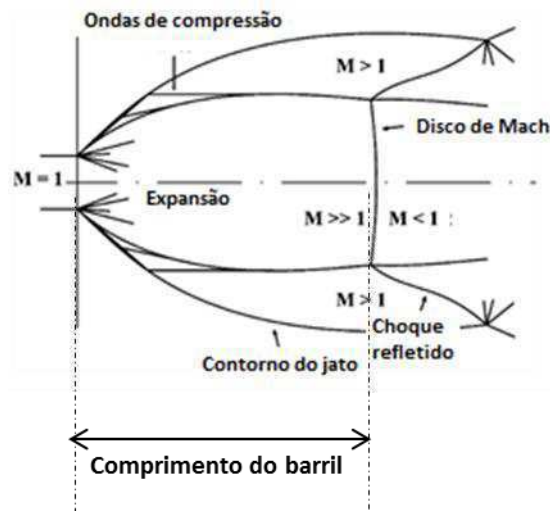
No entanto, como descreve Birch (1984), quando a pressão aumenta, provocando uma expansão que aumenta a velocidade, chegando a uma pressão crítica em que a velocidade atinge a velocidade do som, um aumento maior de pressão a partir desse ponto não altera a velocidade sônica local. A partir deste ponto, fala-se em escoamento de jato sub expandido, com velocidade restringida à velocidade do som na fonte da emissão (escoamento obstruído), sendo o escoamento tipicamente compressível.

Neste escoamento compressível, ocorre uma expansão na saída com uma conseqüente redução da pressão e densidade, seguida de uma compressão nos contornos da onda com conseqüente aumento da pressão e densidade. Este fenômeno converge para formação de ondas de choque, termodinamicamente favoráveis, que se repetem até que sejam dissipadas ao longo do escoamento, trazendo o escoamento à condição subsônica no sentido de levar o gás as condições ambientes (SUZUKI, 2013).

Estas ondas de choque na saída do orifício são, em geral, oblíquas, e modelos unidimensionais já não podem ser utilizados para representar o processo a partir deste ponto. O resultado desta combinação de ondas oblíquas na saída do orifício são explicadas pela Teoria de Prandtl-Meier

(RATHAKRISHNAN, 2006). A formação de uma onda de choque normal, devido à interseção das ondas de expansão e compressão (ondas oblíquas) dá origem ao disco de Mach, e a região de “choque” se apresenta na forma de “barril”, conforme ilustrado na Figura 2.1 (BONELLI *et al.*, 2013).

Figura 2.1: Barril na saída do orifício para escoamento obstruído



(Fonte: adaptado de BONELLI *et al.*, 2013)

As pressões encontradas na região do “barril” são maiores que à pressão atmosférica e, por causa disso, considera-se que o ar ambiente, não entra nesta zona. Também pelo motivo das altas pressões, as velocidades nessa região são supersônicas (WEBBER, 2011).

Ewan e Moodie (1986) explicam que a velocidade no disco de Mach torna-se sônica e que, após essa região de choque, o escoamento passa a ser subsônico. Os mesmos autores desenvolveram a partir de dados experimentais, uma expressão (Equação (1)), para calcular o tamanho do “barril”.

$$\text{comprimento_do_do_barril} = 0,77d_e + 0,068d_e^{1,35} \cdot \frac{P_e}{P_a} \quad (1)$$

onde as dimensões são em milímetros, d_e é o diâmetro do orifício, P_e é pressão na saída do orifício e P_a é a pressão do ambiente.

A maioria dos modelos que representam dispersão do jato presume um jato cônico com uma distribuição gaussiana em torno do centro da pluma. Assim, Ewan e Moodie (1986) considera que a extensão do barril é uma medida importante na determinação da origem da coordenada axial dos modelos, a partir do qual o jato cônico será validado.

2.2 Modelagem Fenomenológica da taxa de emissão gasosa a partir de altas pressões de estagnação

O escoamento, sob alta pressão, em um pequeno orifício é muito rápido, podendo-se considerar, por esta razão, um processo adiabático. Além disso, entre o reservatório em que um gás está em condições de estagnação e a saída do orifício, as perdas por atritos podem ser desprezadas, de maneira que um modelo isentrópico se mostra uma boa aproximação ao longo do orifício (HILL, 2009).

Segundo a norma NBR 60070-10:1, a taxa de liberação de gases a partir de um recipiente pode ser estimada pela expansão adiabática de um gás ideal. Em uma expansão adiabática sem atrito (processo isentrópico), o sistema realiza trabalho sobre o meio, sem trocar calor com o mesmo, reduzindo sua energia interna e com isso sua temperatura. Neste tipo de processo, pode-se demonstrar por relações termodinâmicas clássicas que:

$$\begin{aligned} P.V^\gamma &= \text{constante} \\ P.T^{\gamma-1} &= \text{constante} \\ P.P^{1-\gamma} &= \text{constante} \end{aligned} \quad (2)$$

onde, γ é o coeficiente de Poisson (índice politrópico de expansão adiabática) e é dado pela razão entre as capacidades caloríficas a pressão e volume constantes, respectivamente:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v} \quad (3)$$

$$Cp = Cv + R \quad (4)$$

onde, R é a constante universal dos gases.

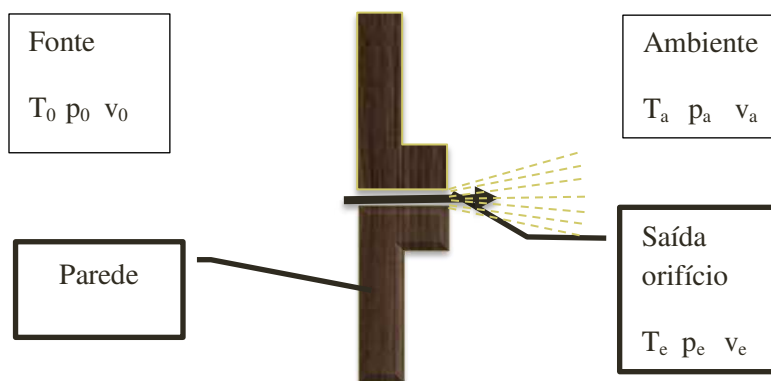
Seguindo este raciocínio e a partir de balanços de massa, quantidade de movimento e energia, as relações entre as variáveis pressão, densidade, velocidade e temperatura, entre 2 pontos de um escoamento isentrópico, podem ser expressas como segue (SISSOM e PITTS, 1988):

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right)^{\gamma-1} = \frac{\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_2^2\right)}{\left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M_1^2\right)} \quad (5)$$

sendo ρ é a densidade, determinada pela equação dos gases ideais, M é o número de Mach (onde Mach = 1, representa a velocidade do som) e os sub índices “1” e “2” representam dois pontos quaisquer.

Neste trabalho, a liberação de gases inflamáveis se dá através de um orifício que separa ambientes a diferentes pressões, conforme Figura 2.2:

Figura 2.2: Esquema de vazamento para o ambiente através de um orifício



onde T, p e v representam temperatura, pressão e velocidade, respectivamente. E os sub índices “0”, “e” e “a”, significam no reservatório, na saída do orifício e no ambiente, respectivamente.

Particularmente, entre as condições de estagnação no vaso, onde a velocidade é nula ($M_0=0$), e um ponto qualquer (M), a Equação (5) se torna:

$$\frac{T_0}{T} = \left(\frac{p_0}{p}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho}\right)^{\gamma-1} = \left(1 + \frac{(\gamma-1)}{2} M^2\right) \quad (6)$$

A pressão crítica, em relação à pressão ambiente, a partir da qual a velocidade é restringida à velocidade sônica ($M=1$), pode ser calculada pela Equação 5, assumindo $P_0 = P_a$, fornecendo a Equação (7) que segue:

$$P_c = P_a \left(\frac{\gamma+1}{2}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (7)$$

Nos casos onde as pressões avaliadas são maiores que a pressão crítica, a velocidade é restringida a velocidade sônica no orifício. Assim, pode-se desenvolver a Equação (6) para $M = 1$, como segue:

$$\frac{T_0}{T_e} = \left(\frac{p_0}{p_e}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{\rho_0}{\rho_e}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{\gamma+1}{2}\right) \quad (8)$$

A velocidade do som na saída do orifício é calculada pela Equação (9), conforme indica a norma NBR 60079-10:1, onde W é a massa molar:

$$v_{som} = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R \cdot T_e}{W}} \quad (9)$$

Rearranjando a relação de temperatura encontrada na Equação (8), para determinar a temperatura na saída do orifício em função da temperatura de estagnação do vaso, pode-se escrever:

$$T_e = T_0 \left(\frac{2}{\gamma+1}\right) \quad (10)$$

Aplicando a Equação (10) na Equação (9), chega-se a seguinte equação para velocidade restringida (sônica) nas condições da saída do orifício por onde o gás é liberado:

$$v_e = \sqrt{\gamma \cdot \frac{R \cdot T_0}{W} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)} \quad (11)$$

A taxa de liberação gasosa (vazão mássica) na saída do orifício é:

$$m_e = \rho_e \cdot v_e \cdot A_e \quad (12)$$

onde A_e , representa a área da seção reta do orifício de saída da emissão gasosa em questão.

Rearranjando a relação de densidade encontrada na equação (8), para determinar a densidade na saída do orifício em função da densidade de estagnação do vaso, tem-se:

$$\rho_e = \rho_0 \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} \quad (13)$$

Calculando a densidade de estagnação a partir da equação dos gases ideais, obtém-se:

$$\rho_0 = \frac{p_0 \cdot W}{R \cdot T_0} \quad (14)$$

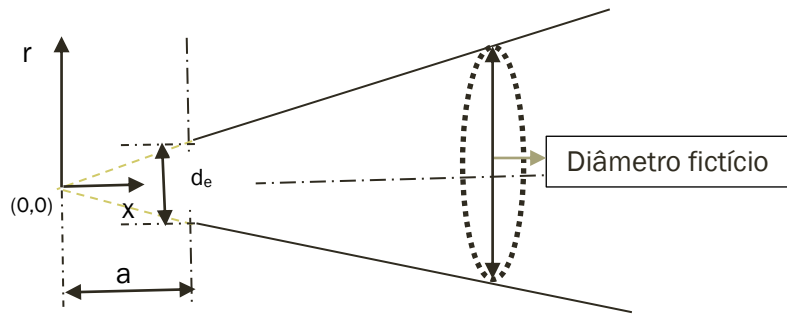
Substituindo o ρ_0 da Equação (13) pela expressão da Equação (14), e aplicando o resultado na Equação (12), chega-se a expressão para a vazão mássica da emissão gasosa na fonte de liberação (orifício):

$$m_e = A_e p_0 \left(\gamma \cdot \frac{W}{R T_0} \left(\frac{2}{(\gamma+1)} \right)^{\frac{(\gamma+1)}{(\gamma-1)}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

2.3 Previsão da dispersão gasosa

Existem vários modelos analíticos unidimensionais disponíveis na literatura para previsão da dispersão de gases em escoamentos subexpandidos. A origem (0,0) nestes modelos é um ponto virtual que estaria no interior do orifício. Por isto, a solução vale apenas a partir de uma distância mínima “a” (Figura 2.3), que é a distância do orifício à origem. Geralmente os modelos usam a hipótese de região totalmente desenvolvida após a região de choque. Neste ponto se considera uma fonte fictícia para o jato, com diâmetro maior que o diâmetro do orifício.

Figura 2.3: Jato cônico



Birch (1984) defende que o comportamento da dispersão na região completamente desenvolvida, é similar ao comportamento de jatos subsônicos incompressíveis. Para tanto, o autor define um diâmetro teórico para fonte de liberação, que em seu trabalho ele chama de pseudo-diâmetro.

Assumindo a hipótese do pseudo-diâmetro, o decaimento da concentração axial de um jato gasoso sob pressões supercríticas, pode ser determinado pela expressão de decaimento hiperbólico. Esse desenvolvimento é bem documentado para jatos turbulentos sob pressão subcrítica (CHEN e RODI, 1980, citados por BIRCH, 1984), sendo descrito pela Equação (16), desde que o diâmetro da fonte seja corrigido (BIRCH, 1984).

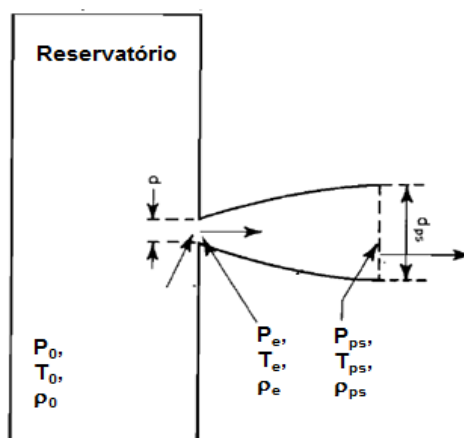
$$\eta = \frac{k \cdot d_{ps}}{z + a} \left(\frac{\rho_a}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad (16)$$

onde “a” é uma origem virtual (no interior do orifício), “k” é a constante de decaimento axial, “z” é a posição ao longo do eixo onde o gás possui concentração (fração volumétrica ou molar) igual a η , ρ_a e ρ_g são as densidades do ar e do gás medidas nas condições ambientes, respectivamente, e d_{ps} é o diâmetro corrigido (pseudo diâmetro).

A

Figura 2.4 mostra esquematicamente o diâmetro do orifício, a partir do qual a equação de decaimento para escoamento turbulento subcrítico pode ser aplicada:

Figura 2.4: Diagrama representativo da emissão gasosa sônica



(Fonte: Adaptada de Birch, 1984)

De acordo com a Figura 2.4, após o ponto “ps”, onde se encontra a fonte hipotética de emissão com diâmetro d_{ps} (pseudo diâmetro), o gás já expandiu completamente para condição ambiente ($P_{ps} = P_a$ e $T_{ps} = T_a$).

Birch (1984) considera um coeficiente de descarga (C_d) no ponto “e” (saída do orifício) devido a não uniformidade do perfil de velocidade nessa região, e apresenta as seguintes equações para a taxa de emissão gasosa (vazão mássica de liberação do gás):

$$m_e = \frac{\pi}{4} C_d \cdot d_e^2 \cdot \rho_e \cdot v_e \quad (17)$$

$$m_{ps} = \frac{\pi}{4} \cdot d_{ps}^2 \cdot \rho_{ps} \cdot v_{ps} \quad (18)$$

Assumindo que as taxas de liberação na fonte real e na fonte fictícia devam ser as mesmas, a relação entre os diâmetros fictício e real é:

$$\left(\frac{d_{ps}}{d_e} \right)^2 = C_D \cdot \frac{v_e}{v_{ps}} \cdot \frac{\rho_e}{\rho_{ps}} \quad (19)$$

Admitindo, por definição em jatos subexpandidos, que a velocidade em “ps” é igual a velocidade do som nas condições ambiente, pode-se aplicar a Equação (9) para determinar expressão para v_{ps} em função da temperatura

ambiente. Utilizando a Equação (11) para expressar v_e em função da temperatura do reservatório, chega-se a relação:

$$\left(\frac{d_{ps}}{d_e}\right)^2 = C_D \cdot \frac{P_0}{P_a} \cdot \frac{T_a}{T_0} \cdot \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1/2)(\gamma-1)} \quad (20)$$

Considerando o estudo realizado com gás natural ($\gamma = 1,35$), e a temperatura do vaso igual a do ambiente, obteve-se a seguinte relação para o pseudo diâmetro:

$$d_{ps} = d_e \cdot \sqrt{0,582 \cdot C_D \cdot \frac{P_0}{P_a}} \quad (21)$$

Aplicando a Equação (21) na Equação (16), chega-se a expressão que aproxima a previsão do decaimento da concentração axial de emissão gasosa sob altas pressões.

$$\eta = \frac{k \cdot d_e}{z+a} \left(0,582 \cdot C_D \cdot \frac{P_0}{P_a}\right)^{1/2} \left(\frac{P_0}{P_a}\right)^{1/2} \quad (22)$$

Birch (1984) realizou experimentos com gás natural (constituído por até 94% de metano) para pressões variando de 2 a 70 bar, a partir de orifício de 2,7mm, medindo a concentração através de cromatografia gasosa. O mesmo concluiu que o modelo é representativo para um valor da constante de decaimento (k) igual a 4,9, admitindo o coeficiente de descarga, $C_d = 0,85$. A fim de verificar aplicabilidade para outros gases, o autor realizou ensaio com etileno a 8 bar, a partir do mesmo orifício, encontrando o mesmo valor para k .

Ewan e Moodie (1986), por sua vez, desenvolveram raciocínio semelhante ao de Birch (1984) para definir um diâmetro fictício, porém assumindo que a temperatura na fonte fictícia é igual à temperatura na fonte real, calculada pela relação de temperatura existente entre o vaso e a saída do orifício ao se considerar a expansão adiabática, Equação (10), não sendo, portanto, igual à temperatura ambiente, como assume Birch (1984). A este novo diâmetro, definido por Ewan e Mood (1987), se dá o nome de diâmetro equivalente (d_{eq}).

Assim tem-se o seguinte desenvolvimento:

$$\rho_e \cdot v_e \cdot A_e = \rho_{eq} \cdot v_{eq} \cdot A_{eq} \quad (23)$$

Como a velocidades em “e” e em “eq”, por definição são iguais, dado estarem na mesma temperatura, pode-se demonstrar que:

$$\frac{\rho_e}{\rho_{eq}} = \frac{A_{eq}}{A_e} = \frac{P_e}{P_a} \quad (24)$$

Desta forma, a relação do diâmetro equivalente (d_{eq}) com o diâmetro do orifício (d_e), bem como a relação da densidade equivalente (ρ_{eq}) e a densidade do gás nas condições ambiente (ρ_g), são, respectivamente:

$$d_{eq} = d_e \left(\frac{P_e}{P_a} \right)^{0,5} \quad (25)$$

$$\rho_{eq} = \rho_g \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{-1} \quad (26)$$

Colocando o d_{eq} em função da pressão no reservatório, tem-se (para $\gamma=1,35$):

$$d_{eq} = d_e \cdot \left(\frac{P_o \cdot \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\gamma/(\gamma-1)}}{P_a} \right) = d_e \cdot \left(0,536 \cdot \frac{P_o}{P_a} \right) \quad (27)$$

Ewan e Moodie (1987) defendem que a previsão do comportamento de jatos compressíveis derivados de modificações de teorias de jatos incompressíveis, em geral, oferece baixa concordância com dados experimentais. Para tanto os autores sugerem a descrição de jato supersônico completamente expandido, encontrado em Kleinstein (1964), que analisa as equações de conservação diretamente a partir do ponto de vista do escoamento compressível.

Adotando o raio equivalente para representar a fonte de emissão do escoamento ($r_{eq} = d_{eq}/2$), a equação de Kleinstein para o decaimento axial da concentração aplicado a jatos subexpandidos, assume a forma:

$$\eta = 1 - \exp \left[\frac{-1}{0,104 \cdot \frac{z^*}{r_{eq}} \left(\frac{\rho_a}{\rho_{eq}} \right)^{1/2} - 0,7} \right] \quad (28)$$

onde o valor 0,104 refere-se ao coeficiente de viscosidade compressível determinado por Kleinstein (1964), z^* é igual à distância em relação à fonte menos 2 vezes o comprimento do barril (Equação (1)) e 0,7 é o chamado comprimento adimensional, também determinado por Kleinstein (1964).

Nos casos em que a distância axial (z) é muito grande em relação ao raio do orifício, o denominador do exponencial se torna grande e a equação pode ser simplificada, assumindo a forma:

$$\eta = \frac{1}{0,104 \cdot \frac{z}{r_{eq}} \left(\frac{\rho_a}{\rho_{eq}} \right)^{1/2}} = \frac{4,807 \cdot d_{eq}}{z} \left(\frac{\rho_{eq}}{\rho_a} \right)^{1/2} \quad (29)$$

Substituindo as Equações (25) e (26) na equação (29), e substituindo o diâmetro do orifício pelo pseudo diâmetro de Birch para comparar as correlações, usando a Equação (21), chega-se a seguinte correlação:

$$\eta = \frac{4,6 \cdot d_e}{z} \left(0,582 \cdot C_D \cdot \frac{\rho_a}{\rho_g} \right)^{1/2} \left(\frac{P_0}{P_a} \right)^{1/2} \quad (30)$$

A Equação (30) mostra que a constante de decaimento (k), presente no modelo de Birch (1984), assumiu o valor de 4,6. Ewan e Moodie (1987) validaram essa expressão para os dados experimentais encontrados no trabalho de Birch (1984), onde percebeu-se uma excelente concordância.

Webber (2011) cita que Britter (1994), após extensiva revisão de autores que estudaram e procuraram entender o complicado comportamento da região de choque, característico do escoamento subexpandido, recomendam o desenvolvimento de Ewan e Moodie (1986). Tal modelo pode ser utilizado para determinar a extensão de uma atmosfera explosiva provocada por emissão gasosa, bastando calcular o z quando o η for igual ao limite inferior de explosividade do gás (LIE).

2.4 Classificação de Área – Atmosferas explosivas de gás

Todos os conceitos e definições deste tópico, necessários para o desenvolvimento deste trabalho, são apresentados com referência à norma brasileira para classificação de área de atmosfera explosiva de gás (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009).

Nas áreas onde quantidade e concentração perigosas de gases inflamáveis podem ocorrer, medidas de proteção devem ser aplicadas de forma a reduzir o risco de explosões. Assim a norma oferece um método de análise e classificação de área que facilita a adequada seleção de equipamentos a serem utilizados com segurança em ambientes que seja considerado possível a existência de uma atmosfera explosiva.

É considerado atmosfera explosiva de gás, a mistura de substâncias inflamáveis com ar, sob condições atmosféricas, na qual, após a ignição, permite a auto sustentação de propagação da chama. Assim, para ser considerada uma atmosfera explosiva, o gás deve estar concentrado no ar atmosférico entre seus limites inferior e superior de explosividade (LIE e LSE, respectivamente).

Na formação de uma atmosfera explosiva, o gás inflamável é liberado para atmosfera a partir de uma fonte de risco (local de liberação). O grau de risco dessa fonte estar relacionada à probabilidade de ocorrência desta liberação e pode ser classificado em:

a) Grau de risco contínuo:

Liberação contínua ou esperada para ocorrer frequentemente ou por longos períodos.

b) Grau de risco primário:

Liberação que pode ser esperada para ocorrer periodicamente ou ocasionalmente durante operação normal.

c) Grau de risco secundário:

Liberação que não é esperada para ocorrer em operação normal e, se ocorrer, é somente de forma pouco frequente e por curtos períodos.

Baseado nos graus de riscos das fontes de liberação do gás inflamável e da duração da atmosfera explosiva formada, as áreas de risco são classificadas em zonas, como segue:

a) Zona 0:

Área na qual uma atmosfera explosiva de gás está presente continuamente ou por longos períodos ou frequentemente.

a) Zona 1:

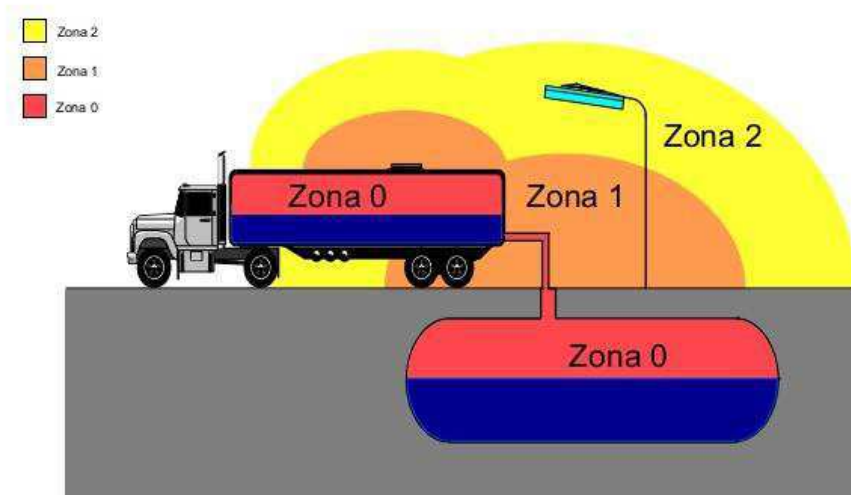
Área na qual uma atmosfera explosiva de gás é provável de ocorrer em condições normais de operação ocasionalmente.

b) Zona 2:

Área na qual uma atmosfera explosiva de gás não é provável de ocorrer em condições normais de operação, mas se ocorrer irá persistir somente por um curto período.

A seguir é apresentado um exemplo que ilustra a classificação de área em zonas. A luminária da Figura 2.5, por exemplo, precisa ter certificação “EX”.

Figura 2.5: Exemplo ilustrativo de classificação de área em zonas



Importante destacar que, tendo estabelecido o grau da fonte de risco, é necessário determinar a taxa de liberação e outros fatores, como ventilação, que podem influenciar o tipo e a extensão da zona.

O volume da atmosfera explosiva é expresso na norma por um volume hipotético chamado V_z . Seguindo a orientação da norma, para determinar-se o volume hipotético V_z se faz necessário estimar a vazão mínima de ar necessária para evitar a geração de uma atmosfera explosiva de gás. Esta, nas condições ambientes, é representada pela Equação (31), que segue:

$$q_{min} = \frac{m_e}{k \cdot LIE_m} \quad (31)$$

onde, q_{min} (m^3/s) é a taxa mínima de vazão volumétrica de ar; m_e (kg/s) é a taxa máxima de liberação do gás na fonte de risco; LIE_m (kg/m^3) é o limite inferior de explosividade em base mássica; k é o fator de segurança do LIE, sendo:

- ✓ $k = 0,25$ (para fontes de risco de grau contínuo ou primário)
- ✓ $k = 0,5$ (para fontes de risco de grau secundário)

Considerando o coeficiente de descarga igual a 1, a taxa máxima de liberação do gás na fonte de risco pode ser calculado pela Equação (15).

Para converter $LIE_{v\%}$ (%vol) em LIE_m (kg/m^3), a seguinte equação pode ser utilizada, para condições atmosféricas normais:

$$LIE_m = 0,416 \cdot 10^{-3} W \cdot LIE_{v\%} \quad (32)$$

O número de renovações de ar em um ambiente é dado pela relação da taxa de entrada de ar no ambiente, em m^3/s , e o volume do ambiente (em m^3). Considerando o número de renovações de ar do ambiente expresso por “C”, medido em (s^{-1}), esta pode ser expressa pela Equação (33) que segue:

$$C = \frac{q_a}{V_0} \quad (33)$$

onde, q_a (m^3/s) é a taxa total de ar através do volume, que pode ser calculada pelo produto da velocidade do vento e a área da seção transversal de entrada do vento no ambiente; V_0 (m^3) é o volume total do ambiente servido pela ventilação.

A velocidade do vento é considerado tipicamente 0,5 m/s no pior caso de ventilação natural em ambientes abertos. Quando o vazamento acontece em ambiente aberto, convencionou-se considerar o volume do ambiente igual ao volume de um cubo de 15m de aresta.

O valor de V_z é representado conforme a Equação (34):

$$V_z = f \cdot \frac{q_{min}}{C} \quad (34)$$

onde f é a eficiência da ventilação em termos de sua capacidade de diluir a atmosfera explosiva de gás; assumindo valores entre 1 (situação ideal) até 5 (vazão de ar impedida).

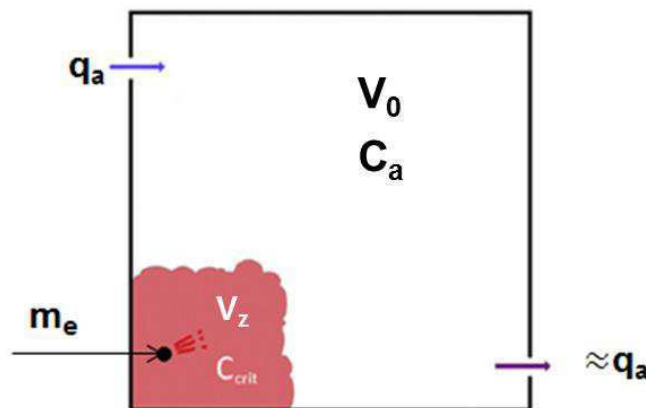
Aplicando-se a Equação (33) na Equação (34), temos que:

$$V_z = \left[\frac{q_{min}}{q_a} \cdot V_0 \right] \cdot f \quad (35)$$

de modo que pode-se interpretar que o volume hipotético V_z é função da relação existente entre o volume mínimo de ar, necessário para diluir a atmosfera até uma concentração média inferior a 25 ou 50% do LIE, e o volume de ar que de fato entra no ambiente de volume V_0 ; bem como do fator de eficiência de ventilação.

Webber (2011) esclarece o significado físico do volume V_z , dividindo um ambiente fechado em duas regiões: uma contendo o contaminante gasoso misturado com o ar, e outro contendo ar puro, conforme Figura 2.6:

Figura 2.6: Nuvem com concentração C_{crit} e volume V_z



(Fonte: Adaptado de WEBBER, 2011)

Sendo $C_{crit}(kg/m^3)$ a concentração da massa de gás na nuvem de volume V_z e $C_a(kg/m^3)$ a concentração da mesma massa de gás no volume do ambiente fechado V_0 , tem-se, por definição:

$$C_{crit} \cdot V_z = C_a \cdot V_0 \quad (36)$$

$$C_a = \frac{m_e}{q_a} \quad (37)$$

Considerando “ C_{crit} ” igual ao limite inferior de explosividade em base mássica (LIE_m) multiplicado pelo fator de segurança k apropriado, e aplicando as Equações (31) e (37) na Equação (36), demonstra-se que:

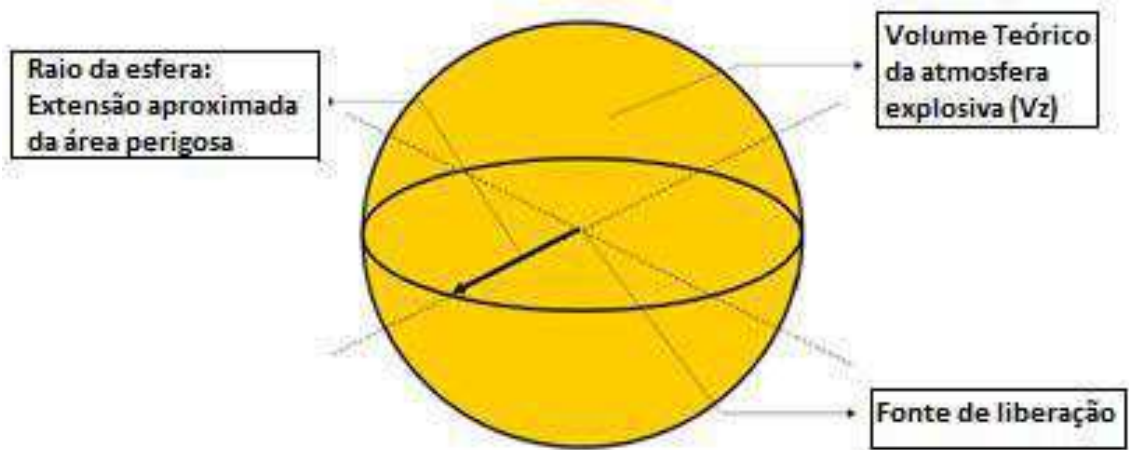
$$V_z = \frac{m_e}{q_a} \cdot \frac{1}{k \cdot LIE_m} \cdot V_0 = \frac{q_{min}}{q_a} \cdot V_0 \quad (38)$$

Como percebe-se, a Equação (38) é similar a Equação (35), para os casos em que a ventilação é ideal ($f=1$).

Seguindo o guia padrão da norma, em posse do valor do volume V_z , determina-se o grau de ventilação. A ventilação é considerada alta quando o volume hipotético da atmosfera explosiva (V_z) é menor que $0,1 \text{ m}^3$ ou menor que 1% do volume total do ambiente (V_0) – o que for menor. Por sua vez, considera-se uma ventilação baixa quando V_z excede V_0 . Se a ventilação não for nem alta, nem baixa, então esta deve ser considerada como média.

Como bem deixa claro a própria norma, o V_z não faz referência a forma nem a extensão real do volume da atmosfera explosiva. No entanto, como aponta Miranda (2013), a tendência é assumir que o volume tem a forma esférica, de onde pode-se estimar o valor fictício da extensão da zona a partir do raio da esfera com centro na fonte de liberação, conforme Figura 2.7, extraída de Miranda (2013).

Figura 2.7: Volume hipotético V_z



(Fonte: adaptada de MIRANDA, 2013)

Webber (2011) explica que as considerações para o cálculo do V_z são baseadas na existência de paredes, não sendo aplicáveis a ambientes abertos. O autor ainda enfatiza que, curiosamente, apesar do conhecimento bem documentado nos últimos 40 anos, a norma não faz nenhuma menção à dispersão gasosa. Ainda chama a atenção no que se refere à consideração, sem justificativa, de dimensões espúrias para o ambiente aberto, como o cubo de 15 metros de aresta e uma velocidade de vento igual a 0,5m/s; alertando que o volume da nuvem gasosa no ambiente aberto, mesmo para baixa velocidade, por efeito da dispersão (negligenciada pela norma), pode ser significativamente menor que o cubo representativo do “volume do ambiente aberto” (que é levado em consideração no cálculo do V_z), produzindo assim resultados completamente arbitrários para o valor do volume hipotético.

Em relação à disponibilidade da ventilação, fala-se em três níveis:

a) Boa:

Ventilação está presente praticamente de modo contínuo;

b) Satisfatória:

Espera-se que a ventilação esteja presente sob condições normais de operação. Descontinuidades são admitidas desde que estas ocorram esporadicamente e por curtos períodos;

c) Pobre:

Ventilação que não atende ao padrão de ventilação satisfatória ou boa, mas não espera-se que descontinuidades ocorram por longos períodos.

A Tabela 2.1 correlaciona o grau de risco da fonte de liberação com o grau e disponibilidade de ventilação para determinar o tipo de zona da área a ser classificada, onde a sigla “ED” significa que a zona tem extensão desprezível e o símbolo “+” significa “envolvida por”.

Tabela 2.1: Guia normativo para Classificação de Área

| Grau da fonte de risco | Ventilação | | | | | | |
|------------------------|-----------------|--------------|-----------|--------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| | Grau | | | | | | |
| | Alto | | Médio | | | Baixo | |
| | Disponibilidade | | | | | | |
| | Boa | Satisfatório | Pobre | Boa | Satisfatório | Pobre | Boa, Satisfatório ou Pobre |
| Contínuo | Zona 0 ED | Zona 0 ED | Zona 0 ED | Zona 0 | Zona 0 + Zona 2 | Zona 0 + Zona 1 | Zona 0 |
| Primário | Zona 1 ED | Zona 1 ED | Zona 1 ED | Zona 1 | Zona 1 + zona 2 | Zona 1 + zona 2 | Zona 1 |
| Secundário | Zona 2 ED | Zona 2 ED | Zona 2 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 1 ou até zona 0 |

(Fonte: ABNT NBR 60079-10-1:2009)

A norma deixa claro que as equações, descritas neste subtópico, utilizadas como referência para classificação de área, não são destinados a serem considerados como o único método de avaliação, sugerindo inclusive o modelamento computacional em algumas situações.

Em relação à extensão da zona, esta é afetada, segundo a norma (que por simplicidade considera que outros fatores permanecem inalterados), pelos seguintes parâmetros:

a) Taxa de liberação de gás ou vapor:

Quanto maior a taxa de liberação de material inflamável, maior será a extensão da área classificada. Essa taxa de liberação depende da geometria da fonte de risco e é tanto maior quanto maior for a velocidade de liberação e concentração do gás liberado;

b) Limite inferior de explosividade (LIE):

Para um dado volume liberado, quanto menor o LIE, maior a extensão da zona;

c) Ventilação:

Segundo a norma com o aumento da ventilação, a extensão da zona é normalmente reduzida. Obstáculos que podem impedir a ventilação podem aumentar a extensão da zona. Por outro lado, alguns obstáculos, por exemplo, diques, paredes ou tetos, podem limitar a extensão.

Também segundo a norma, a extensão da atmosfera explosiva de gás é quase sempre independente da velocidade do vento. A não ser quando o material é liberado a baixa velocidade ou se sua velocidade for reduzida pela colisão com um objeto sólido. Neste caso, considera-se que o material inflamável é carregado pelo vento e sua diluição e extensão passa a depender desta velocidade de vento.

Em relação à quantificação da extensão da zona, a norma traz exemplos figurativos de diversas situações para servirem de orientação para magnitude das zonas, objetivando demonstrar resultados típicos encontrados na prática, porém deixando claro que a forma e a extensão podem variar, de forma que sugere o desenvolvimento de normas complementares e específicas para uma dada atividade industrial.

Neste trabalho, são desenvolvidos estudos para confirmação e/ou contestação, com base científica, das influências acima descritas e de outras não consideradas, a fim propor classificação de área, a ser avaliada e comparada com a proposta pela norma.

Capítulo 3

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados trabalhos recentes disponíveis na literatura especializada, acerca do tema de classificação de área de atmosfera explosiva devido emissão de gases inflamáveis. Tais trabalhos vem dando ênfase a necessidade de revisar a norma e destacam a vantagem do uso da fluidodinâmica computacional (CFD) para este fim.

Iving (2008), por exemplo, realizou simulações CFD de emissão gasosa a baixas pressões em um intervalo de pressão de 0,5 a 5 bar e área da fonte de liberação entre 0,25 e 5 mm². Comparando o tamanho da nuvem representativa da atmosfera explosiva com a calculada pela norma internacional (60079-10:2003), concluiu, a partir dos resultados CFD, que o valor calculado pela norma é bastante superestimado. O referido autor defende que estes resultados sugerem a possibilidade de modificar a norma aplicada e/ou relaxamento do guia para classificação de áreas.

Benintendi (2010) apresenta trabalho que dá uma visão geral e justifica o uso de modelos de turbulência (presente nos modelos CFD), para desenvolvimento de modelo mais realístico da dispersão do jato gasoso que promove atmosfera explosiva. Segundo o referido autor o método para classificação de área apresentado pela norma europeia, usado na Inglaterra (EM 60079-10), não dá a devida importância para a concentração do gás e distribuição de velocidade na nuvem. Estes perfis são características bastante marcantes para escoamentos de jatos com grande número de Reynolds, como, por exemplo, em vazamentos em válvulas de descarga e tubulações sob altas pressões, por exemplo. Nesses casos, o autor defende que a influência desses fatores no resultado do tamanho da nuvem é altamente esperada.

Webber (2011) destaca que a norma internacional (IEC 60079-10) além de não ter nenhuma justificativa científica, permite o uso alternativo de fluidodinâmica computacional (CFD). O CFD prevê volume da nuvem gasosa como sendo muito menor que o dado pelo guia da norma, evidenciando grande discrepância no padrão. Para resolver esta discrepância, o autor propõe uma aproximação, através de um modelo integral simples para ser usado com praticidade, cientificamente validado por resultados em CFD, que por sua vez é validado por dados experimentais.

Webber (2011) ainda destaca que modelos integrais de dispersão e ventilação tem sido usado rotineiramente por muitos anos nas análises de risco na indústria química. Assim, sugere uma adaptação a estes modelos para determinar o volume esperado da nuvem gasosa oriunda do vazamento de gás a partir de fontes pressurizadas. Pelo modelo proposto, o autor conclui que a dispersão, e não apenas a ventilação como propõe o guia da norma, determina a extensão da nuvem de gás inflamável.

Papanikolaou (2012), utilizando o ANSYS-CFX, versão 12.1, compara os resultados obtidos com a aplicação de diferentes modelos de turbulências com resultados experimentais para emissão de jato supersônico sub expandido de gás hidrogênio a partir de pequenos diâmetros de orifício (0,25 – 1 mm). Comparando os modelos de turbulência: $k-\varepsilon$, SST (*shear stress transport*) e o $k-\omega$, disponíveis, e variando-se a intensidade entre 5% e 10%, o autor conclui que o modelo de turbulência SST apresentou melhores resultados, e que a intensidade não influenciou significativamente.

O mesmo Papanikolaou (2012) também compara resultados experimentais com as considerações de propriedades de gás real (SCHEFER, 2007) e ideal (BIRCH, 1984), ambos assumindo temperatura do jato igual à atmosférica. Também compara os dados experimentais com o modelo de Ewan e Moodie (1986), que também considera gás ideal, mas que tem a temperatura do jato derivada da expansão isentrópica no orifício. Os dados apresentados no trabalho do referido autor demonstram que o modelo de Ewan e Moodie (1986) foi o que mais se aproximou dos dados experimentais. O comparativo do uso de gases reais (Schefer, 2008) e gases ideais (Birch, 1987), ambos considerando a temperatura do jato igual à atmosférica, mostrou resultados similares.

Santon (2012) discute sobre a determinação do volume V_z , de acordo com o padrão internacional, IEC 60070-10-1:2009, evidenciando que tal procedimento não tem base científica. Este apresenta uma metodologia alternativa para calcular o V_z , validando as previsões por simulações em CFD. Em sua pesquisa, apresenta um modelo simples e prático, que faz uso do raio equivalente e modelo de dispersão apresentados por Ewan e Moodie (1986),

associados a modelos de estimativa da eficiência da ventilação, para calcular o V_z . Os resultados apresentados por Santon (2012) evidenciam o efeito da dispersão na ordem de grandeza da atmosfera explosiva.

Trabalhando com gás natural (94% de metano), Santon (2012) verifica, por resultados em CFD, que o V_z é tipicamente menor que $0,1 \text{ m}^3$ para pressões até 10 bar. Isto indica, segundo a norma, que a ventilação em ambiente aberto é boa, e a classificação de área passa a ser considerada, invariavelmente, como zona 2, de extensão desprezível para fontes de risco secundário.

Santon (2012), no entanto, destaca a perda de precisão quando se trabalha com diâmetros de orifício muito pequeno (diâmetros menores que $0,25 \text{ mm}^2$ e pressões muito altas, próximas a 100 bar. O autor ainda alerta que o critério de $0,1 \text{ m}^3$ para classificar a zona deve ser substituído para 1% do volume do ambiente, nos casos que o ambiente seja menor que 10 m^3 .

O guia italiano CEI 31-35, admite o uso de uma equação para calcular a extensão da área perigosa (d_z), considerando a distância da fonte, ao longo do eixo central do jato, até que a concentração do gás fosse reduzida até o seu limite inferior de explosividade (LIE) do gás. Esta fórmula foi desenvolvida por Tommasini *et.al.* (2013), e é usada para calcular extensões de atmosferas explosivas.

Miranda (2013) apresenta um comparativo de duas metodologias para determinar a classificação e a extensão da área de zonas perigosas causadas por atmosfera explosiva decorrente de vazamento de gás inflamável. A primeira é baseada na norma europeia (UNE 60079/10/1) e a segunda é desenvolvida com base na fluidodinâmica computacional (CFD) usando o *software* FLUENT. O trabalho demonstra que o guia normativo superestima o tamanho da atmosfera explosiva, em relação aos resultados obtidos por CFD. Tais resultados confirmam que o padrão da norma europeia, que também é aplicado no Brasil, deve ser revisado.

Widiatmojo (2016) defende que o fenômeno da dispersão tem uma importante contribuição no entendimento e controle do espalhamento dos gases perigosos. Sugere que medidas experimentais e simulações numéricas

se fazem necessárias para estudar os efeitos no ambiente. Em sua discussão, o autor destaca a confiabilidade da distribuição de concentração através de CFD, mas também defende que alternativas sejam empregadas para reduzir o grande esforço computacional, típico dessa técnica.

Capítulo 4

Metodología

A análise com técnicas de CFD de um problema físico significa resolver os balanços de massa, quantidade de movimento e energia no domínio delimitado por condições conhecidas. Para tanto, neste trabalho fez-se uso do *software* ANSYS CFX 16.1, para definição das simulações de condições de vazamento de gases inflamáveis a serem analisadas com o propósito de classificação de área de atmosfera explosiva.

4.1 Simulação em CFD da dispersão gasosa

Os balanços de massa, quantidade de movimento e energia podem ser expressos de uma forma generalizada, para um sistema cartesiano, a título de ilustração, como (Maliska, 1995):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi) + \left[\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v_y \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z \phi) \right] - \left[\frac{\partial}{\partial x}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z}) \right] = S_\phi \quad (39)$$

A Tabela 4.1 mostra as variáveis e termos fonte típicos da Equação (39):

Tabela 4.1: Variáveis e parâmetros do modelo Fluidodinâmico.

| Equação de conservação | ϕ | Γ | S_ϕ |
|---|----------|-----------------|---|
| Massa Global | 1 | 0 | 0 |
| Quantidade de Movimento na direção η | v_η | μ | $-\frac{\partial P}{\partial \eta} + \rho g_\eta$ |
| Energia | T | $\frac{k}{c_p}$ | $\frac{\mu}{c_p} \Phi + F_e$ |
| Massa do componente i | Y_i | ρD_{iM} | R_i |

onde, v_η é a velocidade na direção η , T é a temperatura, Y_i é a fração molar do componente i, μ é a viscosidade, k é a condutividade térmica, C_p é a capacidade calorífica, ρ é a densidade, D_{iM} é a difusividade do componente i na mistura M, P é a pressão, F_e é uma fonte externa de calor e R_i é a taxa de reação química (decomposição ou formação do componente i).

O detalhamento das equações de conservação, utilizada pelo CFX 16.1 na resolução do modelo via CFD, bem como o uso de equações constitutivas e modelos de turbulência para fechamento do sistema são encontrados bem documentados na literatura especializada (ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2006). Conforme recomenda Papanikolaou (2012), no estudo de vazamento de gases sob pressão supercríticas, neste trabalho foi adotado o modelo de turbulência SST (*Shear Stress Transport*), disponível no *software* ANSYS CFX 16.1.

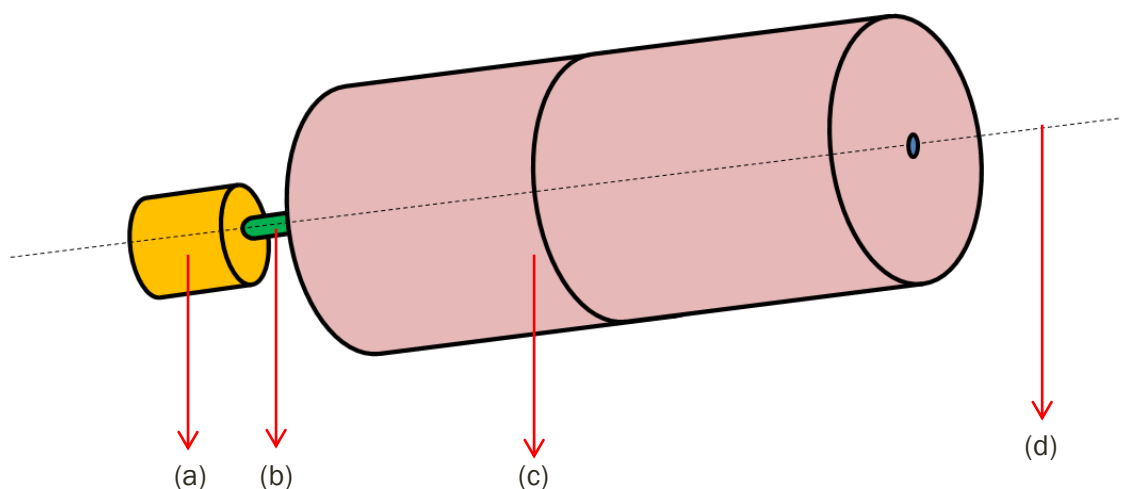
As simulações em CFD foram projetadas para prever o fenômeno da dispersão gasosa sob altas pressões, seguindo as seguintes etapas típicas:

- a) Definição da geometria - Domínio onde serão resolvidas as equações de conservação e transporte;
- b) Definição da malha - Discretização do domínio onde será aplicado o método numérico dos volumes finitos, baseado em elementos;
- c) Definição do modelo: materiais, condições de contorno e critérios de convergência do método numérico;
- d) Solução das equações de conservação e modelo de turbulência;
- e) Análise dos resultados, após convergência da simulação.

4.2 Parametrização da Geometria

Neste trabalho são consideradas as condições de estagnação no reservatório e o orifício está no interior do domínio computacional. A vazão na saída do orifício, a partir do qual a dispersão acontece na atmosfera, foi calculada a partir das condições no reservatório. Um esquema, fora de escala, para representar o domínio de cálculo é apresentado na Figura 4.1:

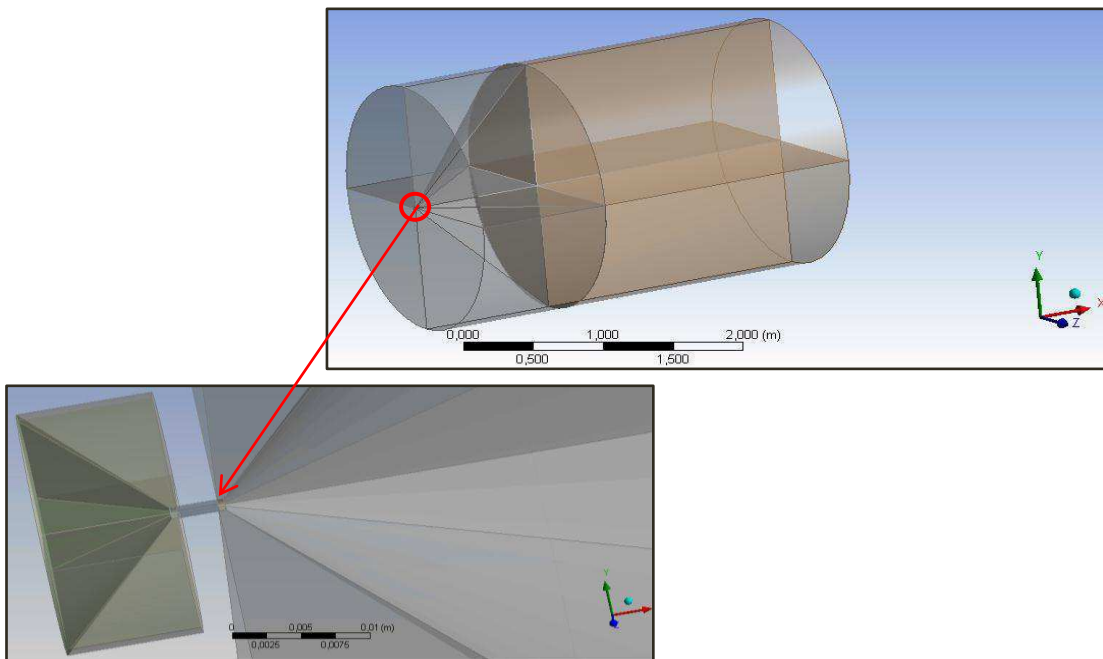
Figura 4.1: Esquema do domínio de cálculo



A parte destacada e identificada pela letra (a) na Figura 4.1, representa o reservatório. Já o orifício é representado pela parte destacada e identificada pela letra (b). Entende-se que o comprimento observado do orifício representa a espessura entre o ambiente interno do reservatório e o ambiente externo ao mesmo. O ambiente externo, por sua vez, é destacado e identificado pela letra (c). As representações do reservatório, orifício e ambiente externo estão alinhadas em torno de um eixo (identificado pela letra (d)), ao qual será chamada linha central.

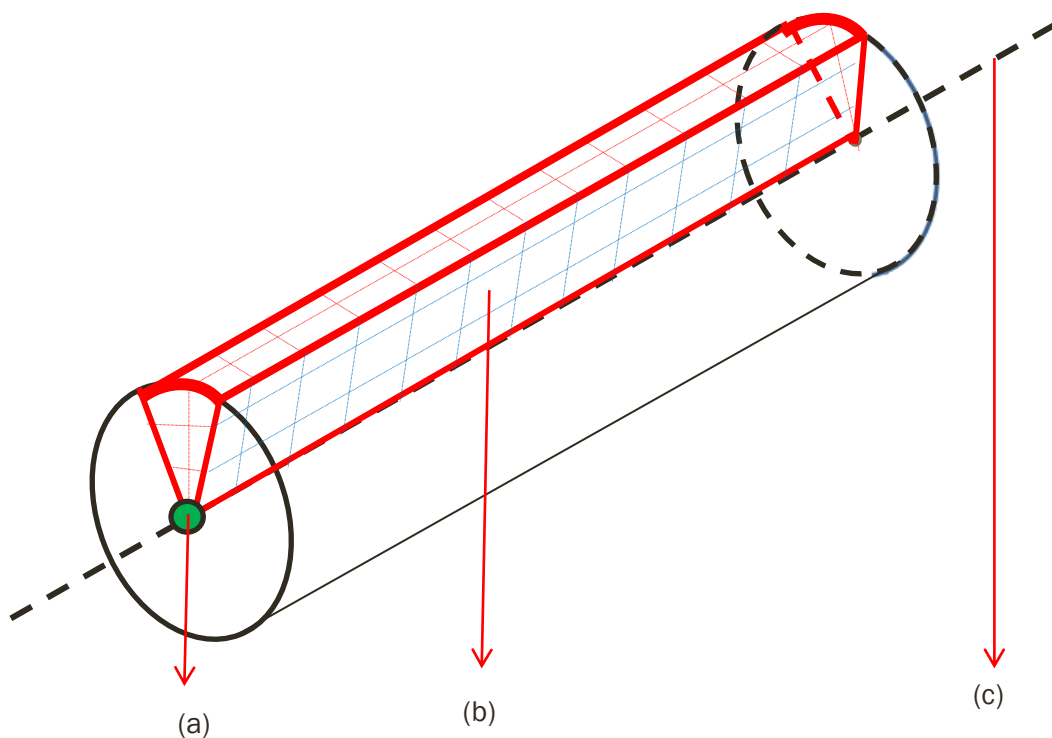
A representação de todo o domínio em escala, a partir do gerador de geometria do *software* utilizado, pode ser verificado na Figura 4.2. Como será mostrado mais adiante o comprimento do domínio varia a depender das condições de vazamento. A título de exemplo, a Figura 4.2 mostra um ambiente externo representado por um cilindro de 2 metros de diâmetro e 3 metros de comprimento, para um orifício de apenas 1 mm de diâmetro. Dado a grande diferença de dimensões, a região do orifício só pode ser visualizada através de uma ampliação de escala nesta região, como destacado na Figura 4.2.

Figura 4.2: Geometria do domínio de cálculo (destaque para orifício)



Essa geometria pode ser simplificada, com vistas à redução do esforço computacional por uma “fatia”, desde que seja imposta uma condição de axissimetria. Esquemáticamente esta fatia ao longo da linha central é apresentada na Figura 4.3, fora de escala:

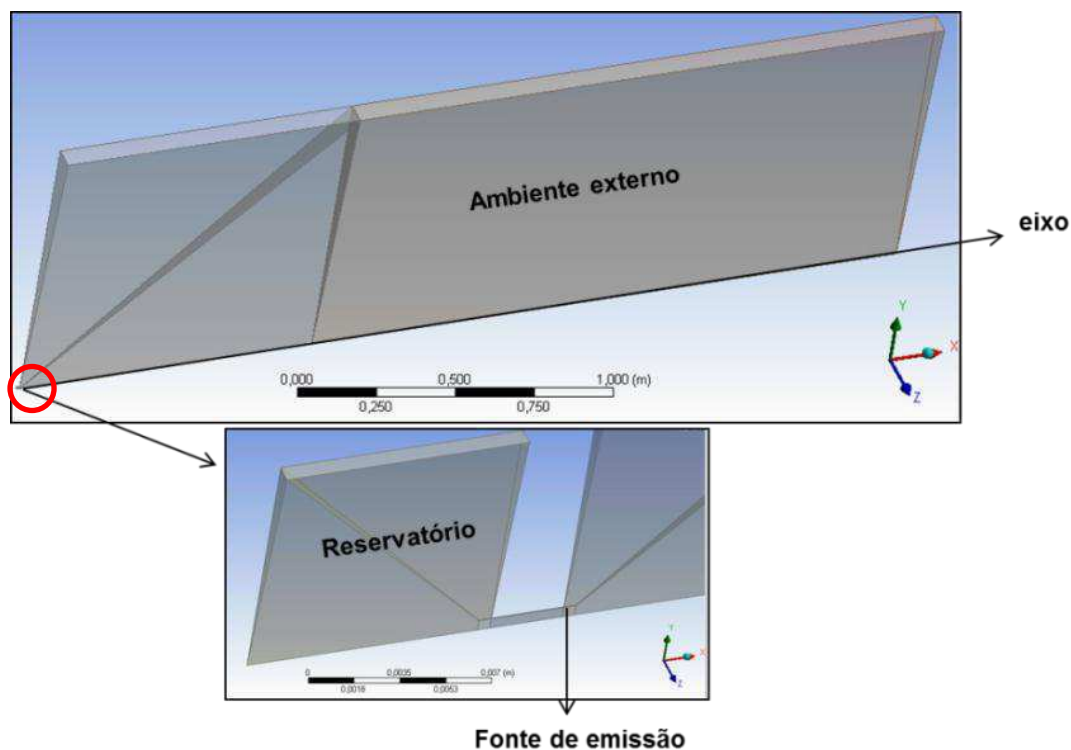
Figura 4.3: Esquema de uma fatia representativa do ambiente externo



Na Figura 4.3 destaca-se o orifício em (a), uma das duas faces da “fatia” em que é imposta a condição de simetria (b) e o eixo, aqui chamado de linha central (c). Dado à condição de simetria na face indicada, entende-se que o comportamento do vazamento na fatia em destaque se repete em fatias vizinhas, por revolução em torno da linha central, de maneira a representar o cilindro.

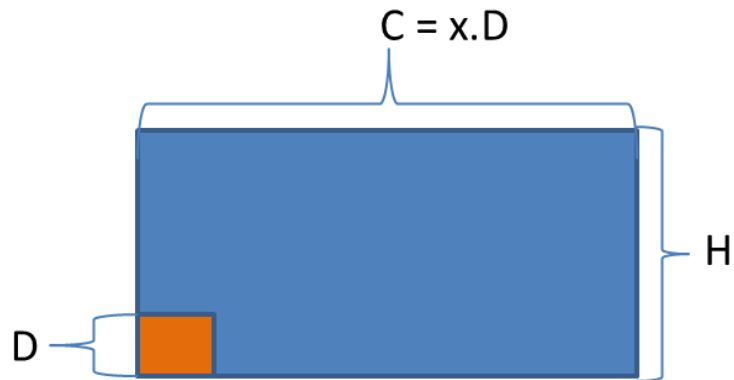
A representação em escala do domínio de cálculo na forma de “fatia” pode ser vista Figura 4.4. Por motivos já explanados, a região do orifício é apresentado em destaque com aumento de escala para que seja possível a visualização. O domínio é uma fatia de 4° em torno do eixo, seguindo recomendação do manual da ANSYS para condição de axissimetria.

Figura 4.4: Definição da geometria (detalhe para região da fonte de emissão)



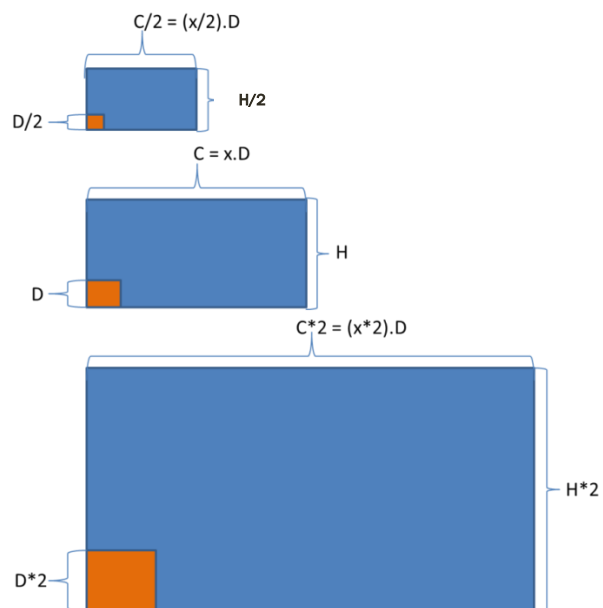
Para que o domínio seja adequado ao estudo de classificação de áreas, os contornos não devem interferir na previsão de frações molares muito pequenas (em torno de 0,5%). Para que fosse possível verificar um comprimento do domínio que fosse suficientemente grande para este propósito, esta dimensão foi parametrizada em relação ao diâmetro do orifício, como esquematicamente é demonstrado na Figura 4.5:

Figura 4.5: Parametrização do comprimento do ambiente externo



onde D (mm) é o diâmetro do orifício, C (m) é o comprimento do ambiente externo, x é a razão entre C (m) e D (mm) e H é o raio do cilindro que representa o ambiente externo. Assim, variando-se x , é possível simular o mesmo caso de vazamento de interesse, para diferentes comprimentos de ambiente externo. Para que o tamanho do domínio fosse adequado para qualquer diâmetro do orifício, este também foi parametrizado, conforme esquema explicativo da Figura 4.6:

Figura 4.6: Parametrização do domínio em relação ao diâmetro do orifício



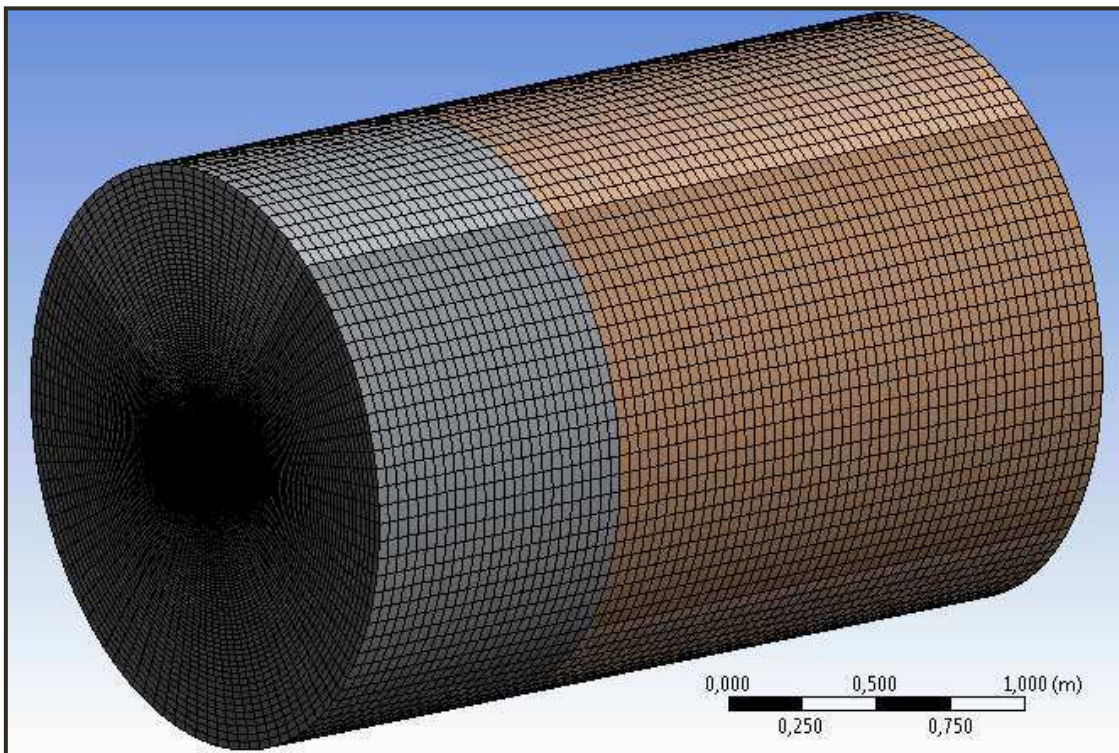
Desta forma, o aumento ou diminuição do diâmetro do orifício, aumenta ou diminui todo o domínio na mesma proporção. Com esta parametrização o domínio assume dimensão adequada para qualquer faixa de diâmetro de fonte de emissão.

4.3 Parametrização da Malha

Em se tratando de modelo computacional para previsão da dispersão gasosa, a compreensão prévia do fenômeno é fundamental para a correta definição do modelo fluidodinâmico, que deverá ser capaz de prever esta característica do escoamento sônico no orifício. Nas ondas de choque, a pressão varia bruscamente ao longo da linha central na ordem de 10^{-5} m (SISSOM e PITTS, 1988). Isto requer refino e estrutura adequada da malha.

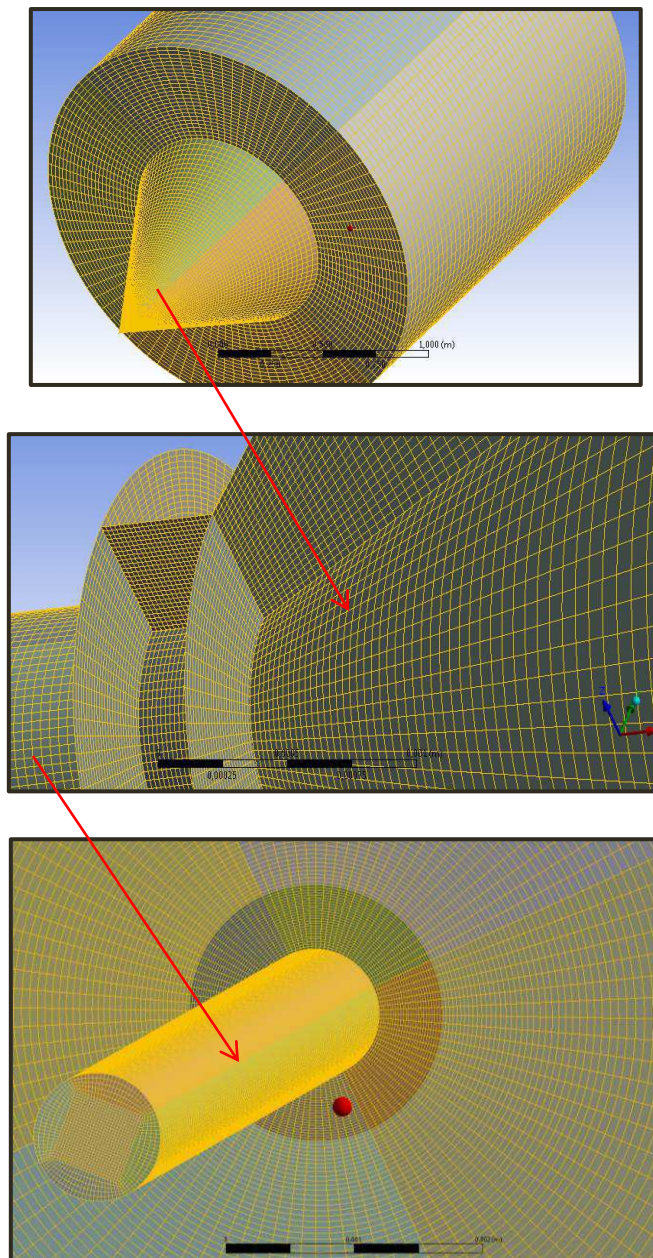
A malha foi pensada para ter uma estrutura hexaédrica, com o propósito de promover maior estabilidade numérica na resolução do problema. Um grande refinamento da malha na região próxima à liberação do gás foi pensado para capturar o efeito da região de choque. Foi promovida uma expansão gradativa na dimensão dos elementos a partir do orifício para que a malha não fosse excessivamente refinada em todo o domínio. Esta malha para a geometria completa é vista na Figura 4.7 e receberá o nome de malha 3D.

Figura 4.7: Estrutura da malha 3D do domínio de cálculo



A região do orifício por ter dimensões muito reduzidas, se comparadas ao domínio todo, não é visualizada na Figura 4.7. A visualização da estrutura da malha no orifício pode ser verificada na sequência de ampliação de escala demonstrada na Figura 4.8:

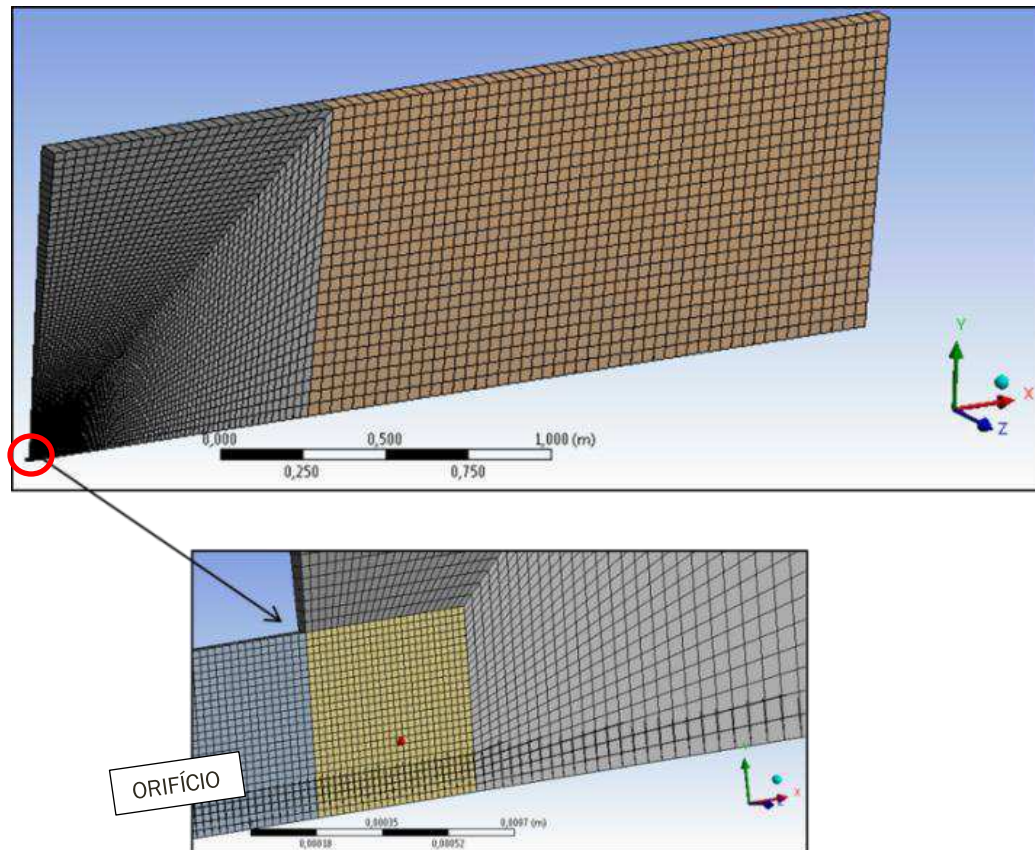
Figura 4.8: Estrutura da malha 3D na região do orifício



Como será mostrado mais adiante, o número de elementos da malha varia de acordo com o número de elementos ao longo do diâmetro do orifício. Para o caso apresentado na Figura 4.8, foi adotado 50 elementos ao longo de um diâmetro do orifício igual a 1 mm.

A mesma estrutura apresentada foi também imposta ao domínio em forma de “fatia”. Neste domínio pensou-se em ter apenas um elemento na espessura da fatia. Esta malha recebe, neste trabalho, a denominação de malha 2D, e pode ser vista na Figura 4.9, onde é dado o destaque, com aumento de escala, para a região do orifício.

Figura 4.9: Estrutura da malha (detalhe para região de liberação do gás)

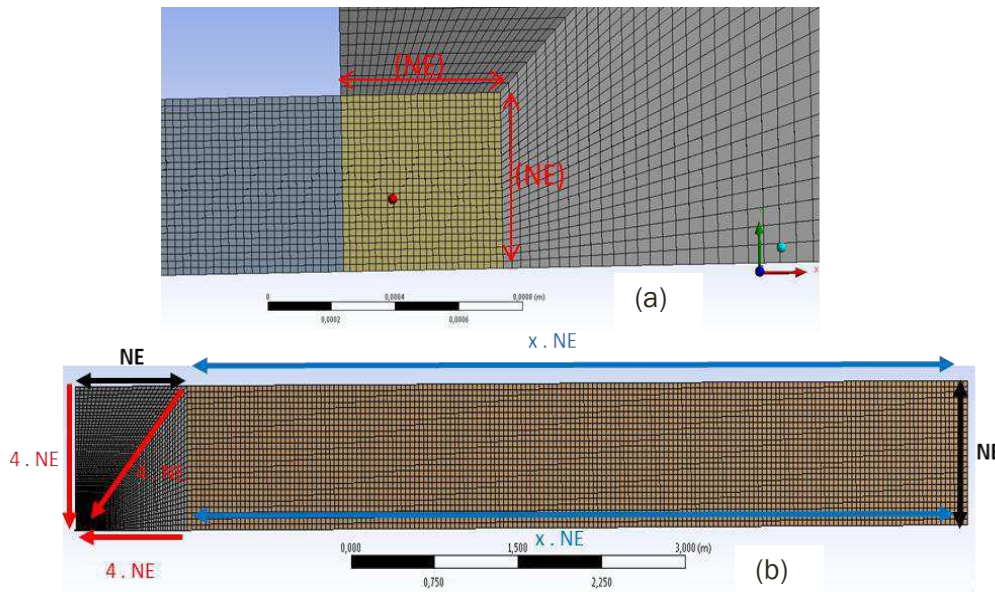


É possível verificar-se no destaque da região de liberação, na Figura 4.9, que a partir do orifício os elementos crescem gradativamente, de forma que o número de elementos que são impostos ao longo de 0,5 mm (raio do orifício) é igual ao número de elementos ao longo de 1 m (raio do cilindro que representa o ambiente externo).

O grau de refinamento deve ser verificado para que seja reduzido o tempo de simulação sem perda de precisão do resultado. Para aumentar ou reduzir o grau de refinamento, foi feita a parametrização da malha em relação ao número de elementos ao longo do diâmetro do orifício. Desta forma, todas

as arestas da geometria devem ser selecionadas e estabelecido quantos elementos ela deve ter em relação ao número de elementos no orifício, conforme é apresentado esquematicamente na Figura 4.10:

Figura 4.10: Parametrização da malha



Na Figura 4.10 (a) é mostrado, por ampliação de escala, a região do orifício, de onde pode-se verificar o número de elementos (NE) ao longo de seu raio. Todas as demais linhas da geometria tem um número de elementos relacionados ao “NE” do orifício, conforme se verifica em Figura 4.10(b). Desta maneira, aumentando o “NE”, refina-se o domínio por inteiro, mantendo-se a estrutura da malha.

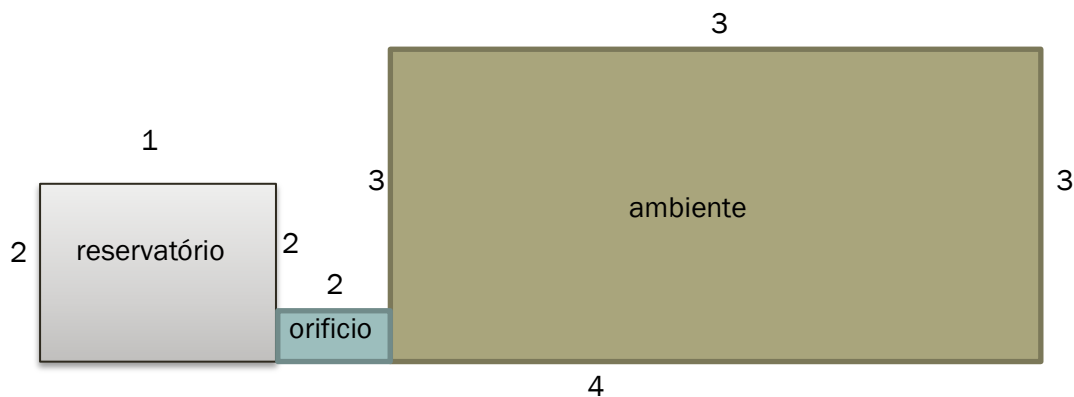
Percebe-se ainda, que o número de elementos ao longo do comprimento do domínio que representa o ambiente externo também está relacionado a “x” (razão entre o comprimento do domínio (em metros) e o diâmetro do orifício (em milímetros)). Com isso, a alteração da forma do domínio, ao variar-se seu comprimento ou o domínio por inteiro, não altera a estrutura da malha. Assim, a malha parametrizada é adaptável à variação de forma do domínio que, por sua vez, tem liberdade para atender a forma estabelecida para condições de vazamentos particulares.

4.4 Parametrização do Modelo

Para o estudo do escoamento de gases inflamáveis sob altas pressões, a partir de um orifício de seção reta, foram adotadas os seguintes pressupostos: regime estacionário, escoamento turbulento, sem reações químicas, não-isotérmico e compressível.

Foram impostas as condições normais de temperatura e pressão para o domínio representativo do ambiente externo. Para se considerar uma condição de axissimetria, que reduza o esforço computacional de uma geometria completa, foi aplicada, na malha 2D, a condição de simetria nas duas faces da “fatia” que tem a linha do eixo em comum. Para os contornos do ambiente externo foi considerada a condição de *opening pressure*. Na Figura 4.11 pode-se observar esquematicamente o domínio e as condições de contorno impostas.

Figura 4.11: Domínio e indicação dos contornos



Condições de contorno (ANSYS CFX-Solver Theory Guide, 2006): 1 e 3 são condições de continuidade do fluxo. 2 é parede e 4 o eixo de simetria. Em 1, a pressão e a temperatura externas são as condições do vaso. Em 2 tem-se uma parede impermeável. E em 3, a pressão e a temperatura externas são as condições ambiente.

Para verificar o comportamento característico e a previsão da dispersão gasosa de jatos subexpandidos, selecionou-se o gás metano, por razão de maior disponibilidade, na literatura especializada, de dados experimentais para validação do decaimento axial da concentração deste material nesse tipo de

escoamento. Dados experimentais, também disponíveis para o etileno, foram verificados com o intuito de agregar confiabilidade a simulação desenvolvida.

As propriedades do metano e etileno utilizadas nas simulações, a serem validadas por dados experimentais, foram obtidas diretamente do banco de dados do ANSYS CFX 16.1. Os dados experimentais foram extraídos do trabalho de Birch (1984). Os limites inferior de explosividade do metano e etileno é de 5% e 2,7%, respectivamente (SEGELER, 2005).

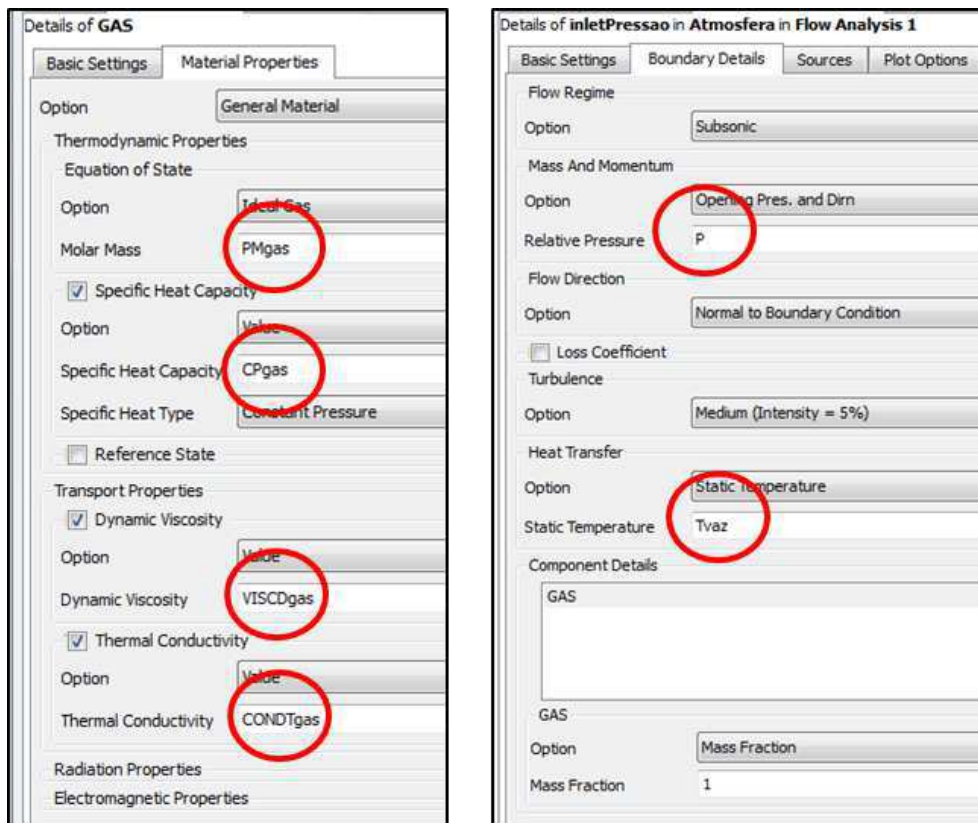
Para o modelo ser considerado adequado para simular o vazamento de misturas gasosas, imaginou-se que as propriedades das misturas poderiam ser as mais variadas dentro de um intervalo possível, a depender dos gases envolvidos e das proporções em que eles se encontrassem. Admitindo propriedades médias constantes para uma determinada mistura, definiu-se para cada caso simulado um grupo de propriedades que representassem a mistura gasosa. Assim a mistura gasosa foi definida pelas seguintes propriedades médias: massa molar (W), capacidade calorífica (C_p), viscosidade (μ), condutividade térmica (k) e o limite inferior de explosividade.

A fim de simular um universo representativo de um grande número de possibilidades de vazamento, utilizou-se a técnica estatística de amostragem multidimensional, chamada Latin Hiper cubo, para gerar pontos aleatórios e não repetidos de propriedades das misturas gasosas (que por ventura podem ser inclusive as propriedades exatas de um gás puro). Aplicou-se a mesma técnica para gerar pontos aleatórios de temperatura e pressão de estagnação (no reservatório) e de diâmetro do orifício.

Cada ponto gerado pelo Latin Hiper cubo é entendido como um parâmetro de entrada. Assim, para cada simulação a técnica estatística fornece 8 parâmetros de entrada aleatórios dentro do intervalo considerado (somando-se os parâmetros do material com os parâmetros operacionais).

Para automatizar as simulações sem que seja necessário atualizar o modelo a cada simulação, os parâmetros de entrada do modelo são alimentados no *setup* na forma de expressões. Tais expressões devem ser selecionadas como *input*, tornando o modelo parametrizado. Ver Figura 4.12:

Figura 4.12: Parâmetros de entrada do modelo



onde PM_{gas} , CP_{gas} , $VISCD_{gas}$ e $CONDT_{gas}$, são expressões que representam a massa molar, capacidade calorífica, viscosidade dinâmica e condutividade térmica do gás genérico, respectivamente, em unidades do S.I.. Os valores de pressão (P) e temperatura (T_{vaz}) do reservatório também são parametrizados adotando expressões para representá-los. A Figura 4.12 mostra que, através das expressões, o *setup* do modelo não fica fixo em valores numéricos, de modo que sendo o valor das expressões selecionadas como *input*, o *setup* se ajusta a qualquer condição de vazamento que se queira simular.

4.5 Estudo da influência dos parâmetros de entrada

A análise da influência de parâmetros como pressão, temperatura, diâmetro do orifício e propriedades dos gases genéricos, a partir das simulações de condições de vazamento aleatórias, se fez utilizando a malha 2D. A partir desta malha, que solicita um esforço computacional bem menor

que a malha 3D, foi viabilizado a simulação de 100 casos de vazamentos do gás metano e de 200 casos de vazamento de gases com propriedades e em condições aleatórios no intervalo apresentado na Tabela 4.2.

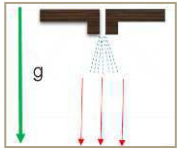
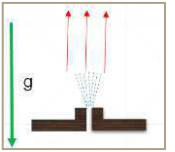
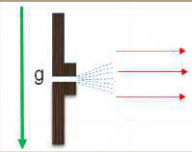
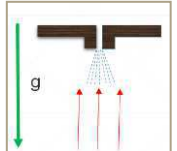
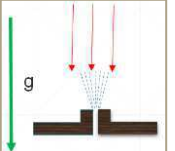
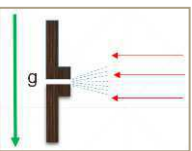
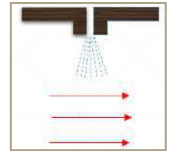
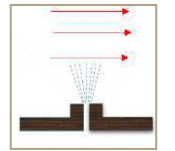
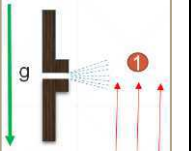
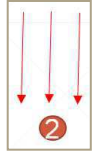

Os valores mínimo e máximo de cada parâmetro de propriedade foram selecionados com base nos menores e maiores valores das propriedades de substâncias puras encontrados em Yaws (1999). O intervalos de pressão e temperatura foram pensados para englobar desde condições brandas de vazamento, até condições severas, típicas de plantas de hidrotreatamento de petróleo. Diâmetros que oferecessem área de emissão menor que 0,25 mm² foram incluídos no intervalo para suprir limitação de trabalhos recentes (SANTON, 2012).

Tabela 4.2: Intervalo dos parâmetros de entrada nas simulações em CFD

| PROPRIEDADE | Valor mínimo | Valor máximo | Unidade |
|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------|
| Condutividade | 0,005 | 0,17 | W/m.K |
| Viscosidade | $4,80 \cdot 10^{-6}$ | $2,24 \cdot 10^{-5}$ | Pa.s |
| LIE | 0,002 | 0,097 | |
| Massa Molar | 2 | 100 | Kg/Kmol |
| Capacidade Calorífica | 250 | 14320 | J/Kg.K |
| Diâmetro do orifício | 0,1 | 2,5 | Mm |
| Temperatura | 273,15 | 673,15 | K |
| Pressão | 1,5 | 120 | Bar |

Para se analisar o efeito da posição do vazamento em relação à direção da gravidade e do vento, onze possibilidades foram simuladas, de acordo com o mostrado na Tabela 4.3. Para estas simulações fez-se uso da malha 3D, uma vez que as condições de vento cruzado e liberação perpendicular à gravidade seriam inviabilizadas pela condição de axissimetria da malha 2D.

Tabela 4.3: Condições de vazamento em relação à gravidade e ao vento

| VAZAMENTO | A favor da gravidade | Contra a gravidade | Perpendicular à gravidade | | |
|------------------------|---|---|--|---|---|
| A favor do vento |  |  |  | | |
| Contra o vento |  |  |  | | |
| Perpendicular ao vento |  |  |  |  |  |

Na condição de vazamento perpendicular à gravidade e perpendicular ao vento, 3 possibilidades foram investigadas: (1) vento contra à gravidade; (2) vento a favor da gravidade e (3) vento perpendicular à gravidade. A fim de utilizar o mesmo domínio de cálculo para qualquer posição de vazamento, foi feito a parametrização da direção da gravidade em relação ao vazamento, que acontece na direção do eixo X. Assim \mathbf{g} passa a ser um *input*, como segue:

- Vazamento a favor da gravidade: $\mathbf{g}(g_x, g_y, g_z) = \mathbf{g}(9,81\text{m/s}^2, 0, 0)$
- Vazamento contra a gravidade: $\mathbf{g}(g_x, g_y, g_z) = \mathbf{g}(-9,81\text{m/s}^2, 0, 0)$
- Vazamento perpendicular à gravidade: $\mathbf{g}(g_x, g_y, g_z) = \mathbf{g}(0, -9,81, 0)$

A análise dos resultados obtidos a partir de um modelo CFD planejado para ser confiável e generalista confere caráter científico ao estudo. A partir destes resultados é proposta uma equação para determinação de extensão.

A equação proposta se presta a ser uma via útil, simples e prática para a atividade de classificação de área perigosa decorrente de atmosfera explosiva, devido emissão de gases inflamáveis. A reprodutibilidade da determinação do alcance da atmosfera explosiva por via desta equação foi verificada a partir de 200 casos de simulações CFD de condições de vazamentos aleatórias.

4.6 Análise dos resultados – Parâmetros de saída

Assim como os parâmetros de entrada, os parâmetros de saída devem estar na forma de expressões que, desta vez, possam ser selecionadas como *outputs*. Os parâmetros de saída são respostas de interesse para a atividade de pesquisa e desenvolvimento de classificação de áreas perigosas. Assim para cada simulação realizada foram retornadas as seguintes respostas:

- Vazão mássica: Calculada a partir da função implícita do CFX, “*massFlow*”, na seção reta do orifício. Por medir a vazão na saída do gás para o ambiente externo, esse parâmetro também é chamado “taxa de liberação”.
- Comprimento do “barril”: Após liberação o gás assume velocidade crescente (supersônica) até que ocorra o choque normal (formando o disco de Mach que limita o “barril”), onde a velocidade é abruptamente reduzida e a partir daí evolui para condição ambiente, conforme descreve Ewan e Moodie (1986). Assim este parâmetro é calculado a partir da função implícita do CFX, “*maxVal*” da velocidade ao longo da linha central.
- Extensão da atmosfera Explosiva: Segundo a norma IEC 60079:10-1, a extensão da atmosfera explosiva é a distância em relação à fonte de emissão em que um gás inflamável é diluído até o seu limite inferior de explosividade(LIE). Assumindo que o LIE pode ser expresso em fração molar, realiza-se o seguinte procedimento para definição de expressão de *output*:

- Expressão para o LIE:

LIE = *input*. Assim o LIE pode assumir qualquer valor entre 0 e 1.

- Expressão para parametrização:

Teste = If (Gas Molar Fraction \leq LIE, 0, 1). Assim o valor de fração molar assume o valor nulo até que atinja o LIE, onde passa a ter o valor unitário.

- Expressão para *output*:

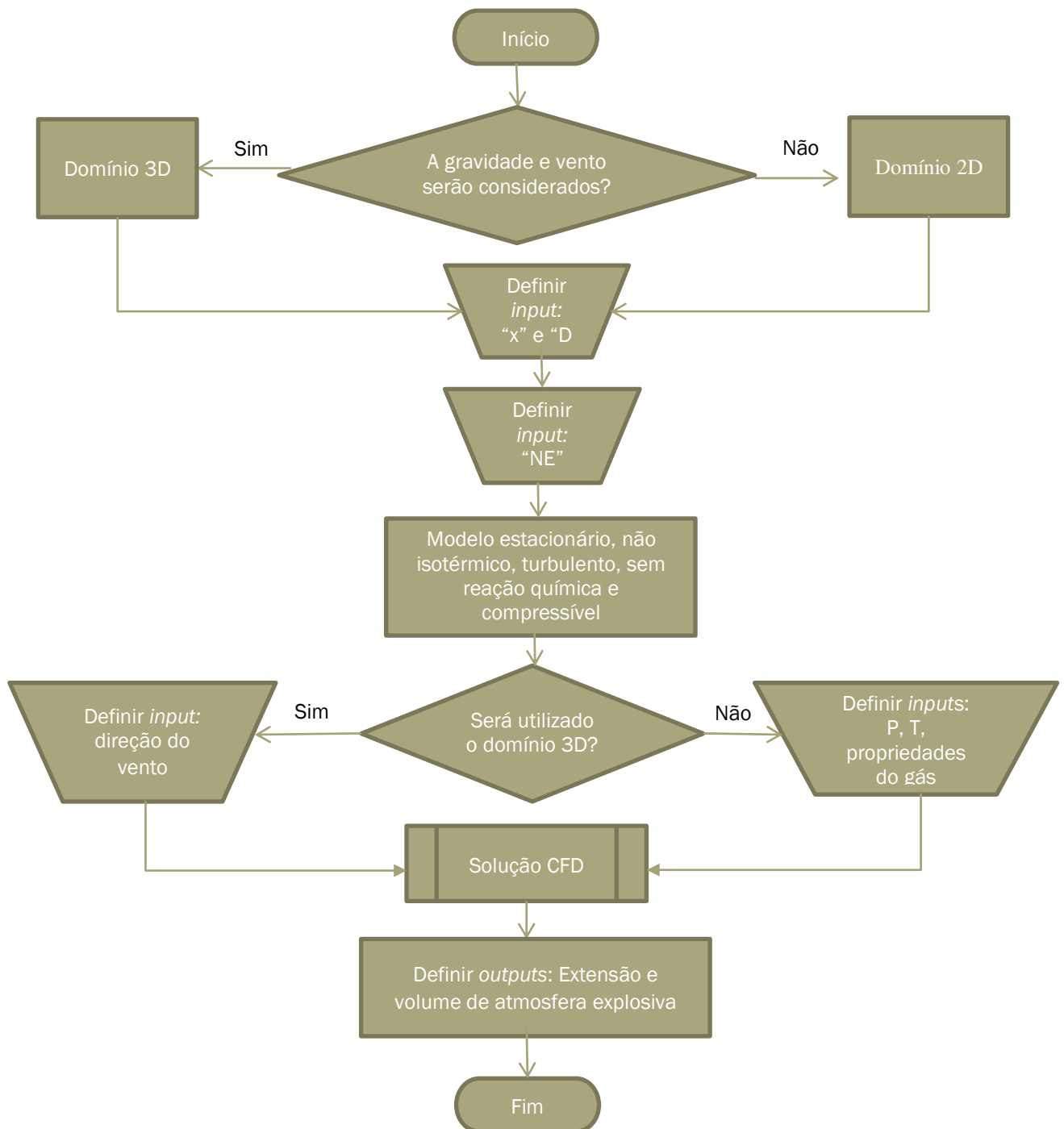
maxVal (Teste)@Central Line. Desta forma, a expressão retorna o ponto exato, na linha central, em que a fração molar se iguala ao LIE (qualquer que seja o LIE).

- Volume da atmosfera explosiva: A norma IEC 60079-10:1, admite um volume hipotético, V_z , igual ao volume de uma nuvem com fração molar média igual ao LIE multiplicado por um fator de segurança, conforme já exposto, sem considerar o efeito da dispersão. O cálculo do volume da *isosurface* retorna o volume de uma nuvem que, por dispersão, parte de uma fração molar igual a 1 na fonte até o uma fração molar igual ao LIE multiplicado pelo fator de segurança, nos contornos da nuvem. A partir destes contornos o gás não mais está em concentrações perigosas. Assim considerou-se o volume da atmosfera explosiva (*output*) através da função implícita do CFX “*Volume*” dos elementos que possuem frações molares entre 1 e o LIE (sendo o LIE e suas variantes por multiplicação pelo fator de segurança, *inputs*).

Os parâmetros de saída retornam e alimentam automaticamente uma tabela de respostas ao final de cada simulação planejada. Para tanto, utiliza-se a ferramenta do *Design Explorer* disponível no ANSYS WORKBENCH, por via do processo de parametrização da simulação a partir do modelo CFD validado.

A Figura 4.13 mostra um fluxograma para determinação de extensão e volume de atmosferas explosivas, a partir de condições aleatórias de vazamento de gases inflamáveis. Tal fluxograma resume todo o percurso desenvolvido para parametrização do modelo CFD, com vistas a automatizar o retorno das respostas de interesse, sendo uma via poderosa para pesquisa e desenvolvimento aplicado na atividade de classificação de áreas perigosas.

Figura 4.13: Fluxograma do processo de parametrização do modelo CFD



Por fim, reconhecendo os efeitos da dispersão, propõe-se um método que ao passo que critica a abordagem normativa, que leva em consideração apenas a teoria da ventilação, também sugere uma relação de risco de ignição com o volume e extensão da pluma, para classificação de área de atmosfera explosiva. Uma comparação com o padrão normativo finaliza o trabalho.

Capítulo 5

Resultados e Discussões

As simulações foram pensadas para serem adequadas à atividade de classificação de áreas de atmosfera explosiva. Inicialmente, portanto, os resultados serão apresentados e discutidos com o intuito de justificar as definições e considerações feitas.

Dando sequência, será realizada uma validação qualitativa, a partir da evidência de previsão da formação do barril. A validação quantitativa se dará por comparação a partir de dados experimentais disponíveis na literatura.

Também serão apresentados e discutidos investigação da influência de diversos parâmetros no tamanho da atmosfera explosiva. A partir destes resultados será apresentada proposta de uma equação integral validada por um extenso número de simulações aleatórias em CFD, que dispense futuro esforço computacional.

Será demonstrada, a partir de simulações em malha 3D, a influência que a direção do vento tem na relação volume – alcance da atmosfera explosiva. Tal relação será apresentada como definição do risco da área perigosa e, a partir daí será avaliada e comparada com a norma, uma nova via para definição de zonas perigosas.

5.1 Influência do comprimento do domínio

Para uma simulação base que considerou o vazamento de metano a partir de um orifício de 1 mm de diâmetro, submetido a uma pressão de estagnação no reservatório de 100 bar e temperatura, no mesmo, de 303,15K, foram feitas simulações para diferentes comprimentos de domínio, variando-se este parâmetro de 2 a 10 metros, conforme resultados vistos na Tabela 5.1. A altura do domínio foi mantida em 1 metro.

Tabela 5.1: Influência do comprimento do domínio

| Comprimento do domínio (m) | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|
| Extensão no LIE (m) | 0,7369 | 0,7369 | 0,7369 | 0,7369 | 0,7369 |
| Extensão em 50% do LIE (m) | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 | 1,44 |
| Extensão em 25% do LIE (m) | 2 | 2,8 | 2,8 | 2,8 | 2,8 |
| Volume da nuvem no LIE (m ³) | 0,003344 | 0,003344 | 0,003344 | 0,003344 | 0,003344 |
| Volume da nuvem em 50% do LIE (m ³) | 0,026521 | 0,026537 | 0,026537 | 0,026537 | 0,026537 |
| Volume da nuvem em 25% do LIE (m ³) | 0,13932 | 0,19366 | 0,19366 | 0,19366 | 0,19366 |
| Vazão mássica (kg/s) | 0,01194 | 0,011954 | 0,011961 | 0,011971 | 0,011981 |
| Comprimento do barril (m) | 0,006699 | 0,006699 | 0,006699 | 0,006699 | 0,006699 |

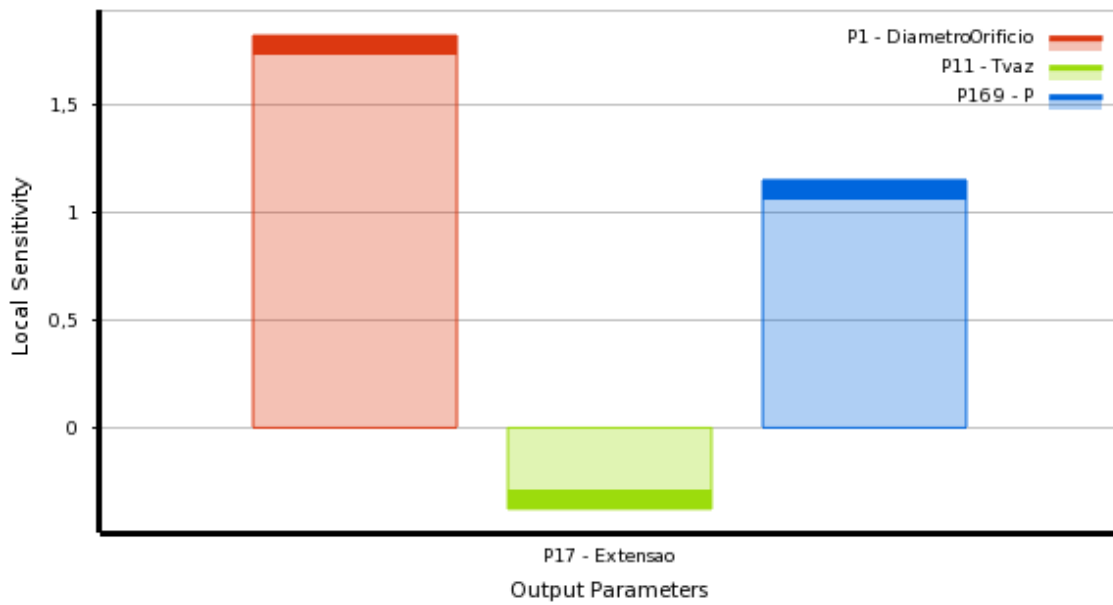
Baseado nos resultados observado na Tabela 5.1, percebe-se que os contornos não influenciam às dimensões das extensões e volumes nos pontos de interesse. Estes resultados também evidenciam que a dispersão do gás ocorre muito rapidamente, de forma que, em geral, as extensões e volumes nos pontos de interesse (que estão relacionados ao LIE do gás), são bastante reduzidas em relação à dimensão dos domínios simulados. Mesmo nos casos que o domínio é pequeno, a não influência dos contornos mostra que a condição *opening* para os mesmos se mostrou adequada para evitar a influência de parede, que seria característica de um ambiente fechado.

Para o menor domínio aplicado (2 metros a partir da fonte de emissão), percebe-se que a previsão da extensão na menor fração considerada (25% do LIE) não foi possível, registrando um valor de extensão igual ao seu limite máximo de cálculo; o que destoa dos demais resultados para outras dimensões de domínios (maiores). O resultado de volume neste ponto (25% do LIE) também assume valor que não faz sentido se comparados aos demais valores encontrados para domínios maiores. Isto alerta para o fato de que além de não influenciar, o contorno deve ser suficientemente grande para incorporar faixas de frações mais reduzidas.

Para verificar qual a condição mais severa, em termos de extensão da pluma a ser capturada pelo domínio, uma análise de sensibilidade local,

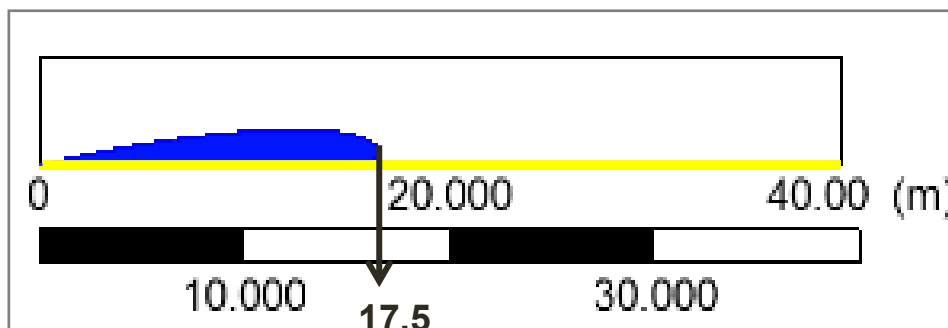
mostrada na Figura 5.1, demonstra a contribuição dos parâmetros de entrada no resultado de extensão da pluma. Para esta análise, foram simuladas 100 condições de vazamentos aleatórios para o gás metano, utilizando a malha 2D. As condições e resultados das simulações são vistas no Apêndice.

Figura 5.1: Análise de sensibilidade local para vazamento de metano



Como percebe-se, o diâmetro do orifício é o parâmetro que mais contribui para o aumento do alcance da nuvem. Portanto, a fim de padronizar um tamanho de domínio que consiga capturar grandes extensões em frações muito reduzidas, idealizou-se uma condição bastante severa, onde submeteu-se o vazamento a partir de um orifício de 2,5mm (limite máximo considerado no intervalo de estudo neste trabalho) à uma pressão no reservatório igual 100 bar. Desta vez, utilizou-se para simulação o gás hidrogênio por ser um gás muito leve, de onde se espera um maior alcance do jato formado. A dispersão até uma fração igual a 0,1% é mostrado na Figura 5.2 :

Figura 5.2: Definição do comprimento do domínio, a partir de vazamento de H₂ a 100 bar, 303,15 K e diâmetro do orifício igual a 2,5 mm.



Analisando a extensão da nuvem limitada por uma fração igual a 0,001, considerada bastante reduzida, percebe-se que um domínio de 20 metros seria suficiente para englobar e, conseqüentemente, capturar resultados em frações bastante reduzidas, mesmo para gases leves, diâmetro da fonte grande e submetidos a altas pressões, sendo, portanto, um comprimento adequado para simular a dispersão gasosa em ambiente aberto. A altura, fixada em 1 metro para o domínio, também se mostrou suficiente para este propósito.

Para representar adequadamente o tamanho do domínio para uma condição de ambiente aberto, a dimensão do mesmo foi parametrizada em relação ao diâmetro do orifício. Desta forma, o aumento no orifício é acompanhado de aumento no domínio, e uma redução no orifício dispensa tamanhos exagerados para o mesmo. Com isso, garante tamanho adequado para se trabalhar qualquer faixa de diâmetro, englobando frações reduzidas.

Assim, considerando que para um diâmetro de 2,5 milímetros foi indicado um comprimento do domínio de 20 metros, adotou-se a razão 8 metros de comprimento do domínio por milímetro de diâmetro do orifício, nas simulações.

5.2 Influência do refinamento da malha

A partir de uma malha estruturada, o número de elementos ao longo de cada aresta da geometria foi parametrizado em relação ao número de elementos ao longo do diâmetro do orifício. Desta maneira, o aumento ou diminuição no refinamento do orifício implica em igual aumento ou diminuição do refinamento em todo o domínio, sem perda da estrutura hexaédrica da malha e do grau de expansão imposto a partir da região do orifício, para que assim fosse garantida a manutenção do refinamento necessário nessa região.

Para um diâmetro de orifício igual a 1 milímetro e comprimento do domínio igual a 8 metros, foram testados três refinamentos de malha, baseado no número de elementos ao longo do diâmetro do orifício, como pode ser verificado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2: Influência do refinamento da malha

| Número de elementos no diâmetro do orifício | 20 | 50 | 100 |
|--|-------------|-------------|----------------|
| Número de elementos no domínio | 4.200 | 26.250 | 119.000 |
| Tempo de simulação | 13min 03seg | 10min 44seg | 1h 25min 50seg |
| Extensão no LIE (m) | 0,756358 | 0,73688 | 0,727184 |
| Extensão em 50% do LIE (m) | 1,5 | 1,44 | 1,46 |
| Extensão em 25% do LIE (m) | 2,9 | 2,8 | 2,9 |
| Volume no LIE (m ³) | 0,004895 | 0,003344 | 0,003013 |
| Volume em 50% do LIE (m ³) | 0,031936 | 0,026537 | 0,02498 |
| Volume em 25% do LIE (m ³) | 0,17802 | 0,19366 | 0,205711 |
| Vazão Mássica (kg/s) | 0,017274 | 0,011971 | 0,011302 |
| Comprimento do Barril (m) | 0,006149 | 0,006699 | 0,006272 |

Analisando os resultados apresentados, percebe-se uma pequena variação para cima nos resultados das malhas menos refinadas. Dado que devido à expansão da malha imposta a partir do orifício, os elementos são cada vez maiores à medida que se afastam deste, entende-se que o aumento na dimensão dos resultados acompanha o aumento no tamanho do elemento da malha menos refinada.

Em relação ao cálculo do volume em 25% do LIE e da vazão mássica, os resultados apresentados pela malha menos refinada perde coerência se comparadas com os resultados das demais malhas testadas. Por tal motivo, o uso da malha grosseira, não ofereceu confiabilidade e foi descartada.

Na escolha da malha a ser utilizada nas simulações, atenção foi dada a relação esforço computacional e precisão do resultado. Analisando a variação dos resultados entre a malha com 50 e 100 elementos ao longo do diâmetro, respectivamente, assume-se que a pequena magnitude da variação nos resultados não justificam o grande aumento no tempo computacional para concluir-se uma simulação. Assim adotou-se o uso de malha hexaédrica parametrizada para um orifício com 50 elementos ao longo de seu diâmetro.

5.3 Análise do modelo

Para analisar o modelo de escoamento compressível, realizou-se simulação do escoamento de metano com temperatura e pressão de estagnação de 50°C e 100 bar, respectivamente, comparando a aplicação da equação de estado dos gases ideais, com o comportamento real representado pela equação de Soave Redlich Kwong, disponível no CFX 16.0.

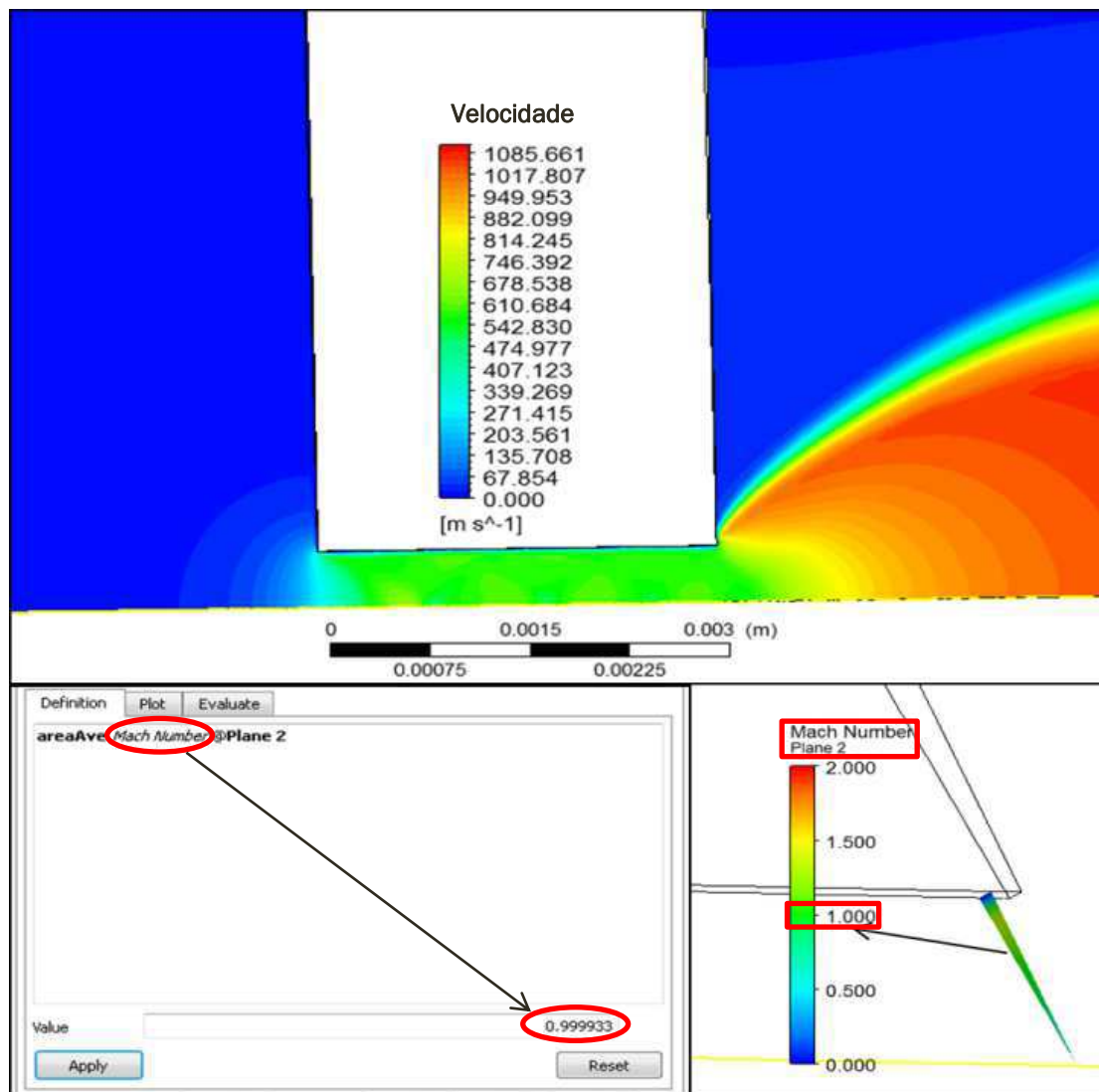
A Tabela 5.3 apresenta os resultados de pressão, temperatura, densidade, velocidade e número de Mach no reservatório e no orifício para o gás ideal e para o gás real, bem como o alcance do jato até que sua fração molar decaia ao seu limite inferior de explosividade (LIE), aqui chamado de extensão do LIE.

Tabela 5.3: Influência da equação de estado na previsão da extensão de ATEX

| | GÁS IDEAL | | GÁS REAL (SRK) | |
|--------------------------------|--------------|---------------|----------------|---------------|
| | Reservatório | Orifício | Reservatório | Orifício |
| Pressão(bar) | 101,013 | 46,617 | 101,013 | 45,2838 |
| Temperatura (K) | 323,15 | 278,527 | 323,15 | 269,778 |
| Densidade (kg/m ³) | 60,3036 | 32,3445 | 66,29 | 36,3002 |
| Velocidade (m/s) | 0 | 430,715 | 0 | 412,270 |
| Número de Mach | 0 | 1 | 0 | 1 |
| Vazão Mássica(kg/s) | 0 | <u>0,0109</u> | 0 | <u>0,0118</u> |
| Extensão LIE (m) | 0,7369 | | 0,7493 | |

Os resultados apresentados na Tabela 5.3 foram extraídos através do cálculo do valor médio de um plano da seção reta da região do reservatório e do orifício, como pode ser percebido na Figura 5.3 para o caso da análise do número de Mach no orifício.

Figura 5.3: Número de Mach no orifício para vazamento de metano a partir de pressão e temperatura do reservatório de 100 bar e 323,15K, respectivamente



Como visto na Tabela 5.3, entre a condição de estagnação do reservatório e o orifício, há uma redução de pressão acompanhada de redução de temperatura, característica da expansão adiabática prevista.

Percebe-se que na parede a velocidade nula é confirmada, e logo após a região que representa a camada limite próxima a parede, a velocidade passa

a ser sônica, representada pelo número de Mach igual a 1. Nota-se que a velocidade praticamente não varia ao longo do eixo do orifício (este que representa o centro do escoamento devido à condição de axissimetria).

O cálculo da média do número de Mach, no plano da seção reta do orifício, fornece resultado que pode se aproximar ao valor unitário, sem perda de precisão, e entendido (de acordo com o que se percebe na Figura 5.3) para toda a extensão da constrição (representada pelo reduzido diâmetro do orifício). Este fato observado condiz com a descrição de Ewan e Moodie (1986), que encontraram em seus experimentos, nas condições que originam o jato subexpandido, uma velocidade restringida a do som no orifício.

Apesar de tanto o gás ideal como o real apresentarem número de Mach igual a um, concordando com o pressuposto teórico, verifica-se que a velocidade do gás real no orifício se mostrou menor que a velocidade do gás ideal na mesma região. Uma vez que, da mesma forma que se percebeu um menor valor para velocidade, também verificou-se um menor valor para temperatura do gás real, confirma-se a dependência da velocidade sônica local com a temperatura (Equação (11)) e justifica-se, sem perda de coerência teórica, os diferentes valores de velocidade para o mesmo número de Mach unitário no orifício, em cada um dos casos estudados (ideal e real).

Pode-se verificar também na Tabela 5.3, que apesar do menor valor de velocidade encontrado para o gás real, se tem valores muito próximos de vazão mássica em relação ao caso ideal. Sendo a vazão mássica calculada pelo produto da densidade, velocidade e área (Equação (12)) e sabendo que nas duas simulações aplicou-se um mesmo diâmetro do orifício, conclui-se e confirma-se pelos dados coletados que a densidade do gás real deve ser e é maior que a densidade do gás ideal, como era esperado pelo desvio da idealidade representado por um $Z < 1$, em que prevalece as forças atrativas.

Comparando-se os resultados do modelo que considera o comportamento ideal com o modelo que considera o comportamento real do gás, percebe-se uma pequena variação na pressão, no entanto, um menor volume molar e menor temperatura, proporcionando uma maior densidade e menor velocidade do gás real em relação ao gás ideal, respectivamente.

Diante disto, o fato de a taxa de liberação do gás não sentir o efeito do desvio da idealidade do gás, pode ser explicada por, no caso do gás real, a maior densidade ser compensada pela menor velocidade, para uma mesma área de seção transversal.

Em se tratando da zona de choque, encontrada no ambiente, imediatamente após a liberação do gás, pode-se analisar perfis de pressão e temperatura, para o gás ideal e real, nas Figura 5.4 e Figura 5.5.

Figura 5.4: Perfil de Pressão na região próximo à liberação do gás

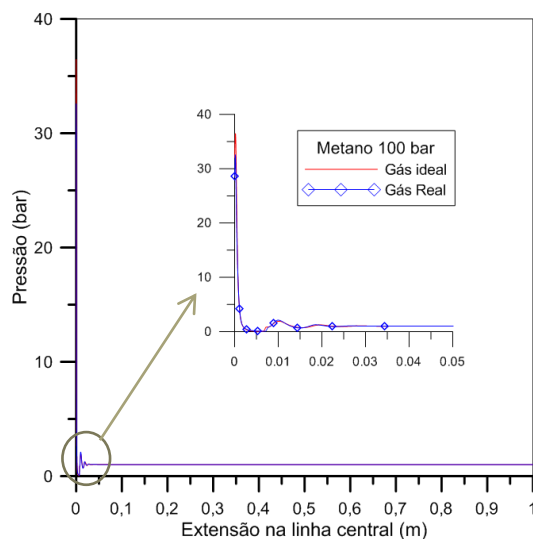
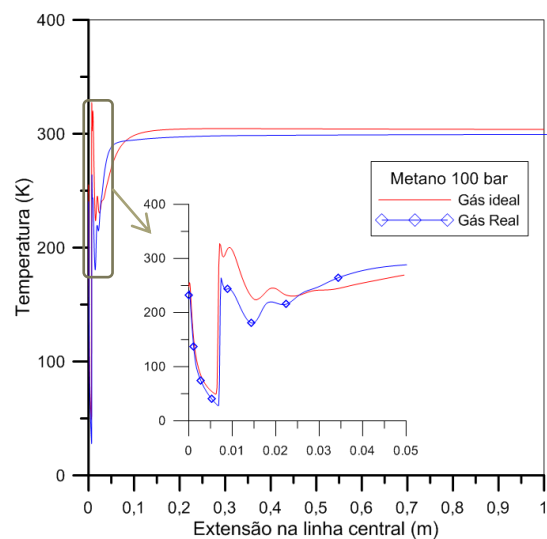


Figura 5.5: Perfil de Temperatura na região próximo à liberação do gás



Como pode ser observada, de fato a variação de pressão na zona de choque apresenta os mesmos valores para a condição real e ideal, de onde se observa uma grande expansão inicial seguida de compressões e expansão sucessivas, cada vez em menor grau, até equilibrar-se com a pressão ambiente.

Já o perfil de temperatura, confirma a tendência da temperatura do gás real ser em geral menor que a temperatura do gás ideal, ambos submetidos às mesmas condições de pressão e temperatura de estagnação e diâmetro do orifício por onde o gás vaza.

Analisando os perfis de densidade e velocidade, percebe-se nas Figura 5.6 e Figura 5.7, que a previsão de maior densidade e menor velocidade para o gás real em relação ao gás ideal também se confirma ao longo desta região. O

que demonstra que o produto entre a densidade e velocidade calculado para o gás ideal e real tende a ser o mesmo, também na zona de choque.

Figura 5.6: Perfil de densidade na região próximo à liberação do gás

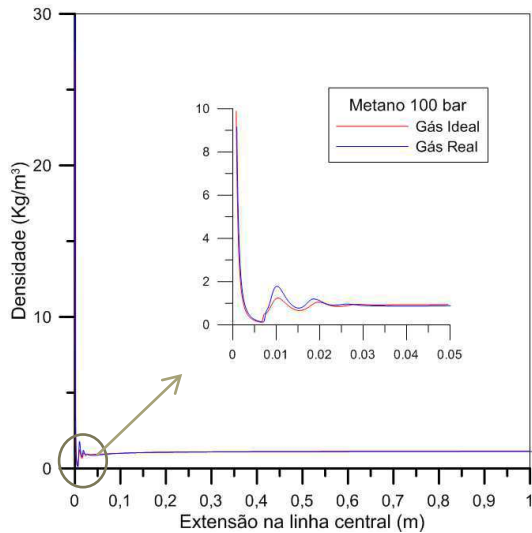
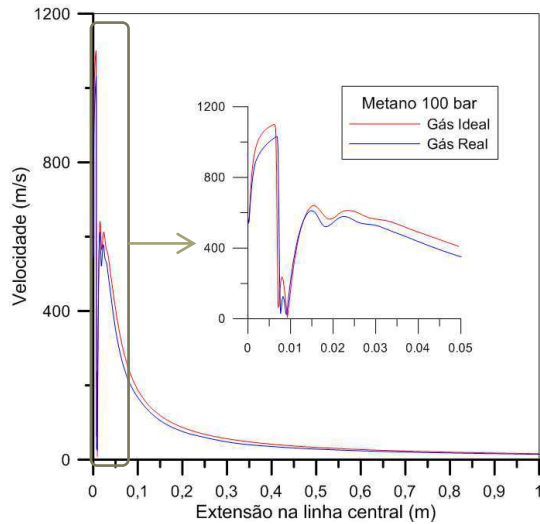


Figura 5.7: Perfil de velocidade na região próximo à liberação do gás



Dado que, confrontando-se os gráficos das Figura 5.6 e Figura 5.7 com os das Figura 5.4 e Figura 5.5, percebe-se que a densidade e velocidade tendem a se igualar nas condições de pressão e temperatura ambiente, fica óbvio que o produto da densidade e velocidade a partir de então, seja para o gás ideal ou para o gás real, será sempre o mesmo.

Comparando a extensão que o jato alcança até que atinja uma concentração, em termos de fração molar, igual ao seu limite inferior de explosividade (LIE), percebe-se que não há diferença significativa entre os dois resultados (gás real e ideal), o que leva a crer que esta extensão está relacionada, fundamentalmente, à taxa de liberação que, como já demonstrado e justificado, não apresenta diferença significativa entre os dois modelos aplicados.

Assim, uma vez que a taxa de liberação calculada tende a ser a mesma para os dois modelos aplicados (ideal e real) e que às condições ambientes são alcançadas muito próximo à fonte de emissão, pode-se concluir que o uso da equação dos gases ideais não compromete o estudo da dispersão do gás inflamável, no tocante à determinação de extensão de área classificada.

5.4 Previsão da estrutura do jato na região da emissão

Para avaliar a previsão do comportamento do gás na região de saída, de onde se espera um comportamento característico de jato subexpandido, descrito por Ewan e Moodie (1986), a partir de suas observações experimentais da estrutura do jato, analisou-se a simulação do vazamento de metano a partir de um orifício de 1 mm e temperatura e pressão do reservatório de 50°C e 100 bar, respectivamente, considerando gás ideal. As condições ambientes consideradas foi de 1 atm e 303,15 K. A região imediatamente após a liberação do gás pode ser vista nas Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10.

Figura 5.8: Campo de Velocidade no Barril (Número de Mach) para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm

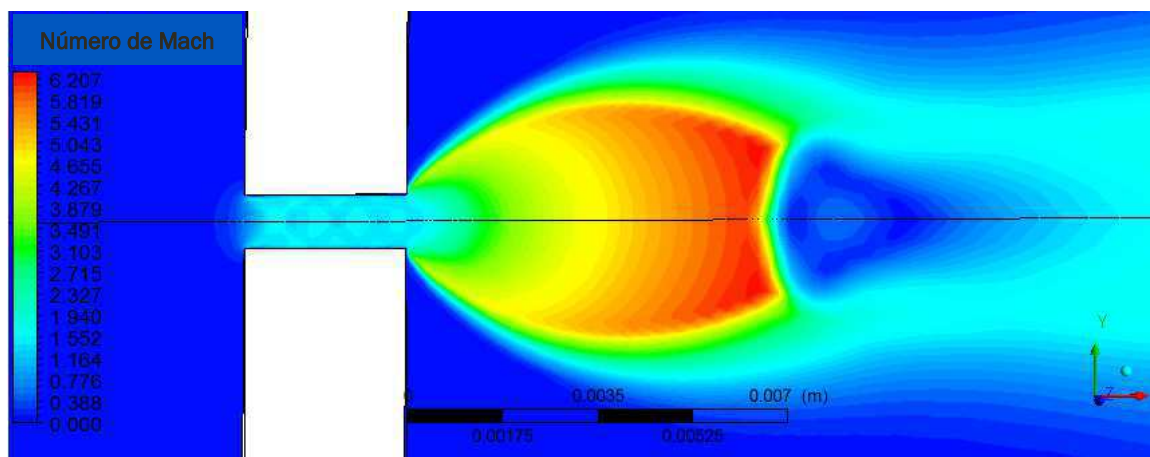


Figura 5.9: Campo de Temperatura no Barril para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm

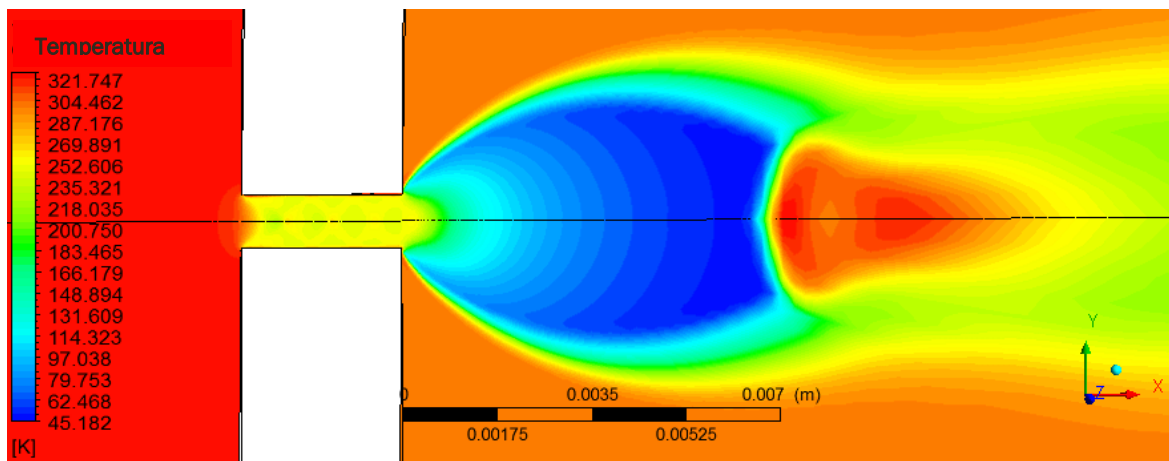
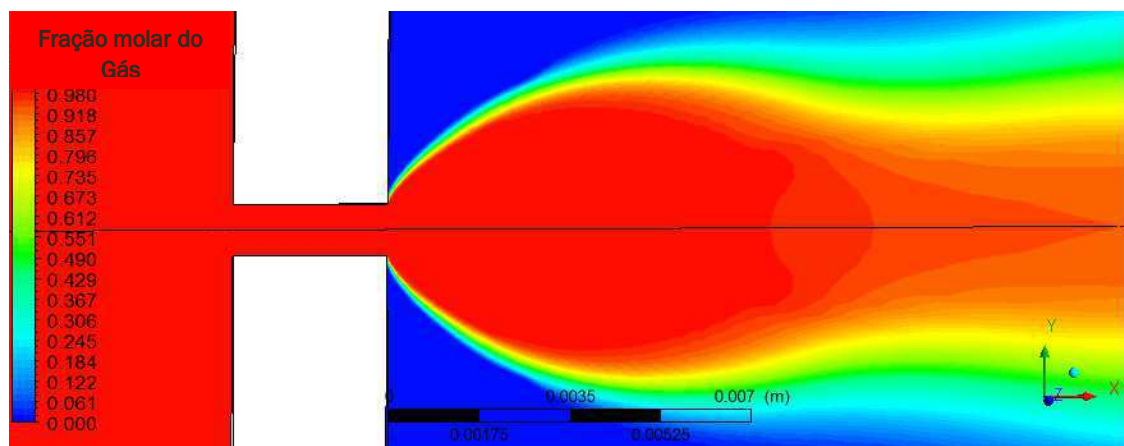


Figura 5.10: Campo de Concentração do gás no Barril (Fração Molar do gás) para vazamento de metano a 100 bar, 323,15K e diâmetro do orifício de 1 mm

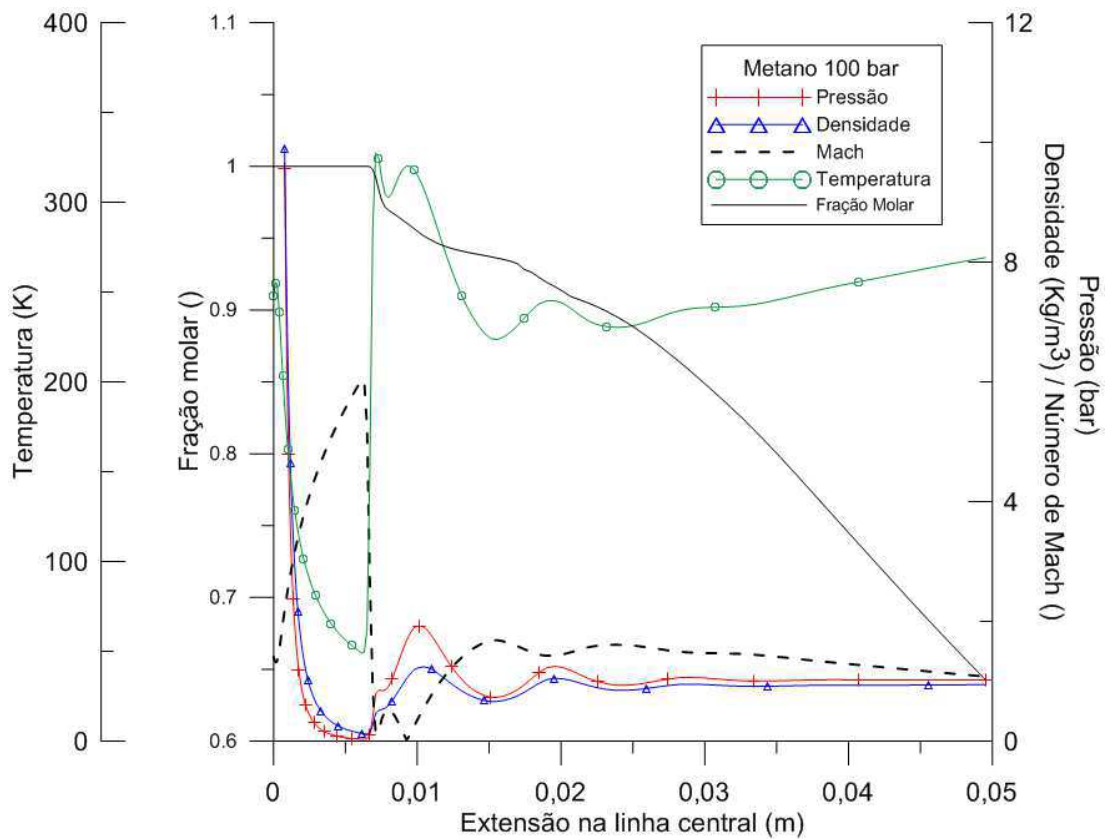


As Figura 5.8, Figura 5.9 e Figura 5.10 mostram os campos de velocidade, temperatura e concentração (em termos de fração molar do gás), na região imediatamente após a liberação do gás, onde pode-se perceber a formação característica do barril (*vide* Figura 2.1), estando de acordo com as observações experimentais de Ewan e Moodie (1986).

Uma análise do comportamento do gás na região imediatamente após o vazamento, correlacionando, simultaneamente, a variação na pressão, temperatura, densidade, velocidade e fração molar ao longo da linha central do vazamento pode ser feita a partir do gráfico da Figura 5.11.

Percebe-se que imediatamente após o orifício, acontece uma grande depressurização (chegando a pressões abaixo da atmosférica), acompanhada de redução de temperatura e aumento da velocidade. Este fenômeno é característico e condizente com a teoria da expansão adiabática em jatos subexpandidos, em que pela rapidez do fenômeno não há troca de calor com a vizinhança. Assim a energia desprendida pelo gás (reduzindo a temperatura) é convertida em energia cinética pelo trabalho de expansão (aumentando a velocidade). Esse fenômeno é considerado uma onda de expansão.

Figura 5.11: Comportamento do gás próximo ao orifício



A velocidade restringida à velocidade do som local no orifício pode ser verificado pelo número de Mach igual a 1 no ponto de saída do gás (*vide* Figura 5.11). Verifica-se, também, que com a evolução de velocidade na direção axial, por motivos já descritos, o número de Mach assume valores cada vez maiores que 1, o que caracteriza um escoamento supersônico na região do “barril”.

Analisando a variação radial de velocidade e temperatura a partir dos contornos do barril (Figura 5.3 e Figura 5.4), percebe-se que a temperatura tende a aumentar e a velocidade reduzir de modo a equilibrar-se às condições ambientes, sendo um desenvolvimento oposto à expansão na direção axial, de onde conclui-se que nos contornos do barril surgem ondas de compressão.

A convergência das ondas de expansão e compressão, chamada de choque normal, dar origem a uma obstrução ao escoamento, que interrompe a expansão (daí o nome jato subexpandido), formando o disco de Mach, que delimita a região do barril. Todo esse fenômeno observado e descrito está condizente com o exposto e apresentado por Bonelli (2013) na forma de figura (Figura 2.1).

A formação do barril, devido o choque normal pode ser verificado no gráfico da Figura 5.11, quando percebe-se que no mesmo ponto que a velocidade é abruptamente reduzida pela obstrução, a pressão e temperatura é abruptamente aumentada, até condições próximas à atmosférica. No caso do presente estudo, em que a pressão de estagnação é muito elevada, o aumento de pressão ainda vai um pouco além que a pressão ambiente, o que vem a provocar nova expansão, desta vez menos evidente, dado o gradiente de pressão em relação à pressão atmosférica ser menor. Esse ciclo se repete sucessivamente e rapidamente (zona de choque), de maneira cada vez mais suave, até que atinjam o equilíbrio com as condições atmosféricas. Nesta evolução, percebe-se que a velocidade tende a voltar a ser sônica (número de Mach igual a 1).

Outro ponto observado na Figura 5.11 é que a fração molar permanece igual a 1 no eixo central, até que ocorra um choque normal, mostrando que não há diluição do gás, pelo ar atmosférico, na região do barril. Este fato se explica, devido a região, imediatamente após a liberação do gás, apresentar pressões muito superiores à atmosférica, o que faz com que não seja possível deslocamento para o interior do jato. Após o choque normal, o gás assume um decaimento semelhante ao dos escoamentos completamente desenvolvidos.

A compressibilidade do escoamento, assumida para o modelo, evidencia que a variação na pressão do sistema provoca alteração no volume molar do gás e, conseqüentemente, na densidade. Assim, assumindo o comportamento ideal do gás, quando a pressão reduz (expansão), o volume aumenta na mesma proporção e o gás fica menos denso, acontecendo o inverso quando a pressão é aumentada (compressão).

Uma vez que se reconhece que a velocidade aumenta com a expansão e reduz com a compressão, pode-se concluir e observar no gráfico da Figura 5.11 que a velocidade e densidade seguem variando inversamente, de modo que o produto da densidade e velocidade tende a se manter constante, mesmo na região de grandes oscilações (zona de choque), o que não seria previsto se considerasse o escoamento incompressível, pois a densidade não mudaria.

A conclusão que o produto da densidade e velocidade permanece inalterado confirma a consideração de Birch (1984) e Ewan e Moodie (1987), de que a vazão mássica na saída do gás é igual ao longo da linha central, desde que se corrija o diâmetro (diâmetro fictício maior que o diâmetro do jato).

A fim de considerar um ponto a partir do qual uma equação de escoamento completamente desenvolvido possa ser utilizada, aplicando a vazão mássica calculada no orifício, os autores consideram um ponto após a zona de choque, considerando que neste ponto a pressão é igual à atmosférica, a velocidade igual a do som local e a temperatura é igual a do reservatório (Birch, 1984) ou igual a do orifício (EWAN e MOODIE, 1987).

As considerações assumidas pelos autores são confirmadas pelo modelo CFD proposto, sendo que, de acordo com o observado na Figura 5.11, a consideração de temperatura igual ao do orifício (menor que a do reservatório) se mostrou mais adequada para representar a temperatura após a zona de choque, o que confirma o maior realismo do modelo de Ewan e Moodie (1987).

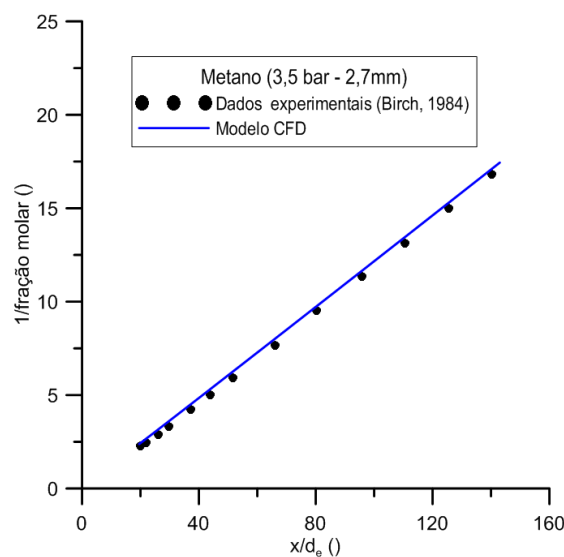
5.5 Validação do modelo CFD

A fim de validar quantitativamente o modelo CFD sugerido neste trabalho, foi feito uso dos dados experimentais disponibilizados na literatura por Birch (1984), que produziu jatos subexpandidos de gás natural, contendo até 92,4% do gás metano e massa molar média de 17,32 Kg/Kmol, a partir de um bico pressurizado com diâmetro interno de 2,7mm. A concentração média do jato foi medida por Birch (1984) a partir de cromatografia rápida (Cross e Robinson, 1971, citado por Birch (1984)).

Realizou-se simulação do vazamento de metano, alterando a massa molar para a que representa o gás natural, de acordo com o valor encontrado em Birch (1984). A simulação foi realizada considerando uma pressão de estagnação de 3,5 bar, de maneira a confrontar os resultados com os dados disponíveis.

A comparação do modelo CFD com os dados experimentais do referido autor são apresentados na Figura 5.12. Os eixos do gráfico desta figura obedeceram à formatação original utilizada pelo autor (Birch, 1984).

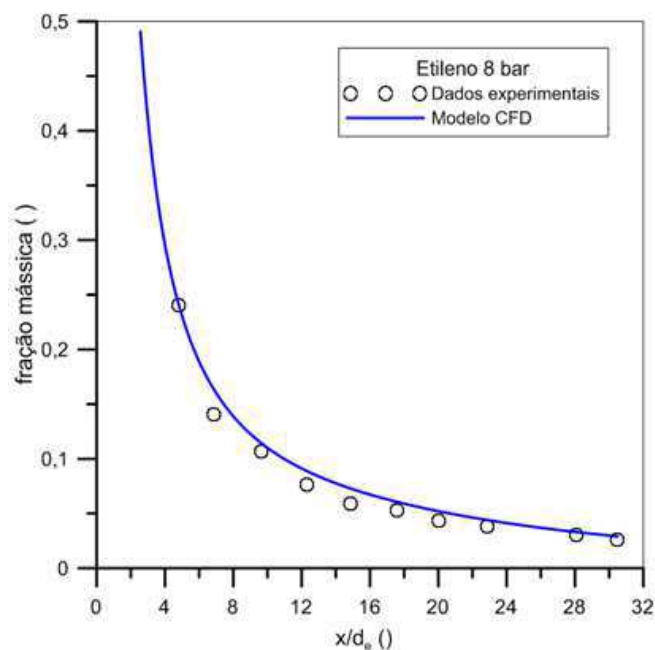
Figura 5.12: Validação do resultado CFD com base em dados experimentais de vazamento de gás natural (92,4% de metano)



Assim o eixo das ordenadas é representado pelo inverso das frações molares encontradas ao longo da linha central. E o eixo das abscissas representa a distância da fonte de liberação em relação ao diâmetro do orifício.

Como percebe-se, o modelo CFD desenvolvido reproduz o perfil de concentração ao longo da linha central medido experimentalmente. Ewan e Moodie (1986) também valida seu modelo utilizando dados experimentais de Birch (1984), aplicado para vazamento de etileno a 8 bar, a partir de um orifício de 2,7 mm. Os referidos autores, no entanto, convertem o eixo das ordenadas para fração mássica. A comparação dos dados experimentais dispostos desta maneira com o previsto pelo modelo CFD desenvolvido, aplicado nas mesmas condições de vazamento, são mostrados na Figura 5.13:

Figura 5.13: Validação do resultado CFD com base em dados experimentais de vazamento de etileno.



Assim como para o vazamento do metano, o modelo CFD desenvolvido também se mostrou adequado para prever a dispersão do etileno. A partir destas validações, considerou-se o modelo desenvolvido apropriado e confiável para futuras análises sob diferentes condições de vazamento.

5.6 Influência das condições de vazamento na extensão de áreas classificadas

A extensão da área classificada é a distância da fonte de emissão em que o gás se dispersa e atinge uma concentração igual ao seu limite inferior de explosividade, que pode ser medido em base volumétrica, na forma de fração molar, ou em base mássica em Kg/m^3 . Para as análises que seguem, será adotado o valor em fração molar.

Dado o fator de segurança sugerido pela norma de 50% do LIE para fontes secundárias e 25% do LIE para fontes contínuas e primárias, as extensões até esses pontos também serão consideradas. Imagina-se que após esses pontos a concentração do gás estará muito abaixo de seu limite inferior de explosividade, sendo bastante improvável a ignição por faísca de algum componente elétrico presente na planta industrial, o que dispensaria a certificação EX para os equipamentos.

Para verificar-se como a extensão varia com a pressão e temperatura no reservatório, bem como com o diâmetro do orifício, foram simuladas 100 condições de vazamentos de metano, aleatoriamente, utilizando a técnica do Latin hipercubo, nos intervalos de condições descritos na metodologia. Todos os parâmetros de entrada e saída das simulações convergidas encontram-se no Apêndice. As simulações foram realizadas utilizando a malha 2D.

A partir dos resultados das simulações, foi gerado, como pode ser visto na Figura 5.14, uma superfície de resposta a fim de analisar-se como a extensão da atmosfera explosiva varia com a pressão e temperatura.

Percebe-se que, para um dado diâmetro, a extensão varia diretamente com a pressão e inversamente com a temperatura do reservatório.

Na Figura 5.15(a) é mostrado a variação da extensão com o diâmetro para diferentes pressões, enquanto na Figura 5.15(b) é mostrada tal variação para diferentes temperaturas. Como percebe-se a extensão aumenta proporcionalmente ao aumento do diâmetro para qualquer valor de temperatura e pressão do reservatório.

Figura 5.14: Variação da extensão de atmosfera explosiva de metano com a pressão e temperatura do reservatório

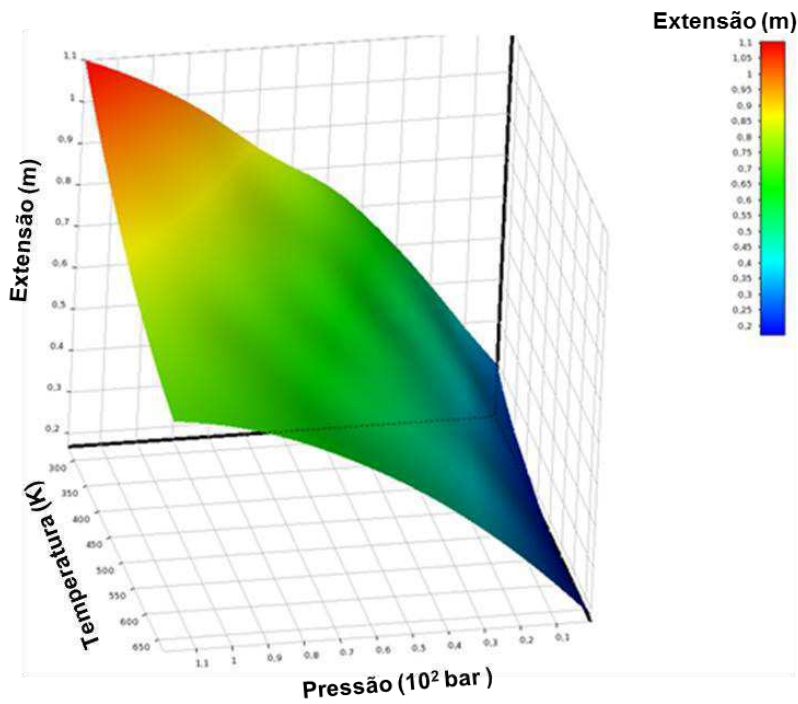
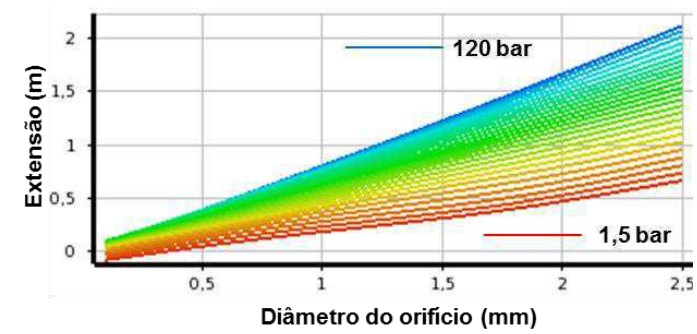
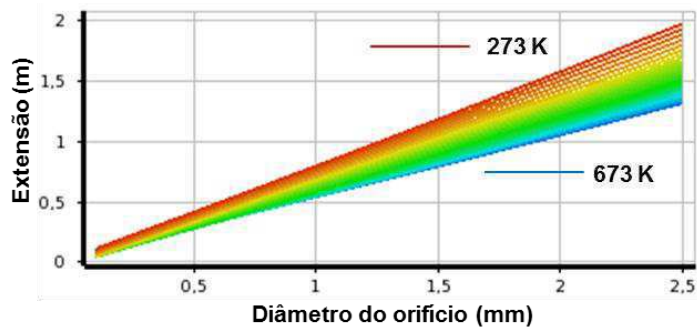


Figura 5.15: Variação da Extensão de atmosfera explosiva de metano com o diâmetro do orifício



(a)



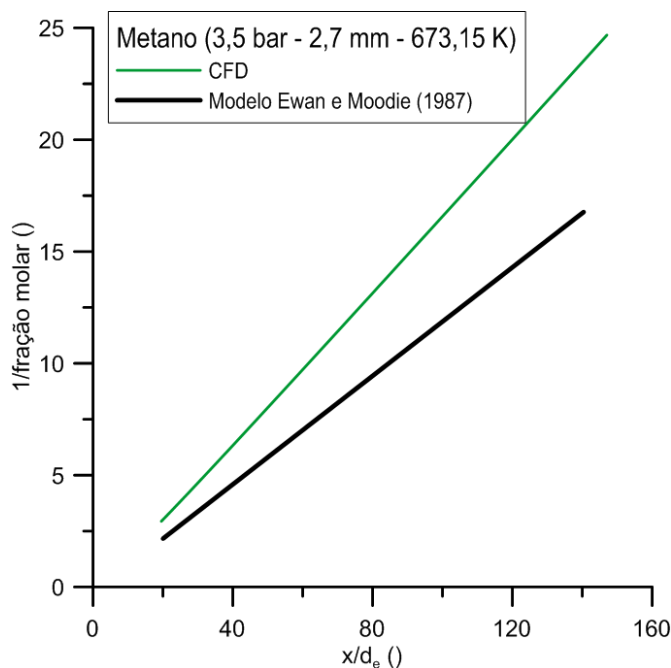
(b)

A dependência com a pressão do reservatório é mais evidente que com a temperatura, sobretudo em diâmetros reduzidos. Já em diâmetros maiores, a dependência com a temperatura ganha importância e não deve ser descartada.

As equações simplificadas por Birch (1984) e Ewan e Moodie (1987) (equações (22) e (30), respectivamente), não levam em consideração, de forma explícita em suas formulações, a temperatura do reservatório, uma vez que supõem, na determinação das constantes aplicáveis às suas correlações, que o reservatório encontra-se na temperatura ambiente.

Realizando-se nova simulação, com as mesmas condições do experimento utilizado para validação do modelo CFD desenvolvido neste trabalho, porém admitindo-se desta vez uma temperatura no reservatório de 400°C (típicas de unidades de hidrotreamento de petróleo, por exemplo), obtém-se o seguinte gráfico comparativo entre a resposta prevista pelo modelo de Ewan e Moodie simplificado (1987) e o modelo CFD desenvolvido neste trabalho.

Figura 5.16: Previsão de dispersão a partir de alta temperatura no reservatório



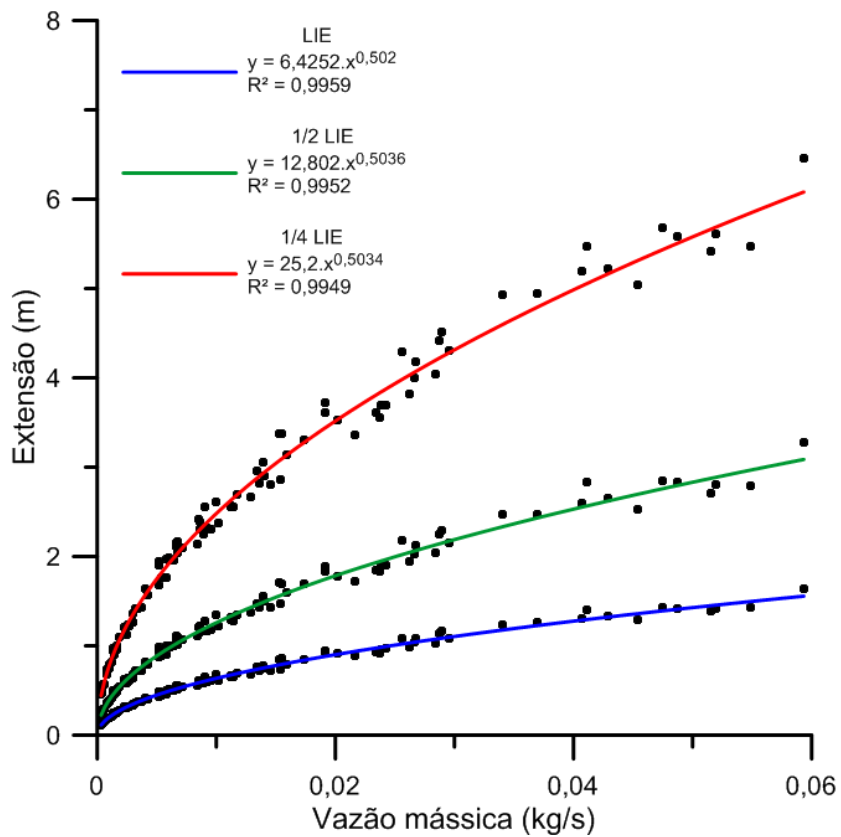
Como pode-se verificar no gráfico da Figura 5.16, para uma mesma fração molar, o modelo CFD, desenvolvido neste trabalho, prevê uma extensão menor que a correlação da literatura, que por sua vez não considera a

influência da temperatura do reservatório na sua formulação, uma vez que assume que o mesmo encontra-se na temperatura ambiente (sendo esta também a condição do experimento que validou sua correlação).

O resultado encontrado pelo modelo CFD neste último caso, é endossado pela conclusão, oriunda da análise das 100 simulações de condições de vazamento aleatórias, em grande intervalo de possibilidades, de que uma maior temperatura no reservatório, provoca menores extensões de atmosfera explosiva.

Na discussão dos resultados do tópico 5.3 deste trabalho, apontou-se o indício de que a extensão estaria fundamentalmente relacionada à taxa de liberação (vazão mássica no orifício). Dado que esta vazão mássica engloba para sua determinação o diâmetro do orifício, pressão e temperatura do reservatório (*vide* Equação (15)), decidiu-se investigar a variação da extensão com a taxa de liberação. Como visto na Figura 5.17, analisou-se a extensão no LIE, em 50% do LIE e 25% do LIE do gás metano, em 100 condições de vazamento aleatórias (apresentadas no apêndice), utilizando a malha 2D.

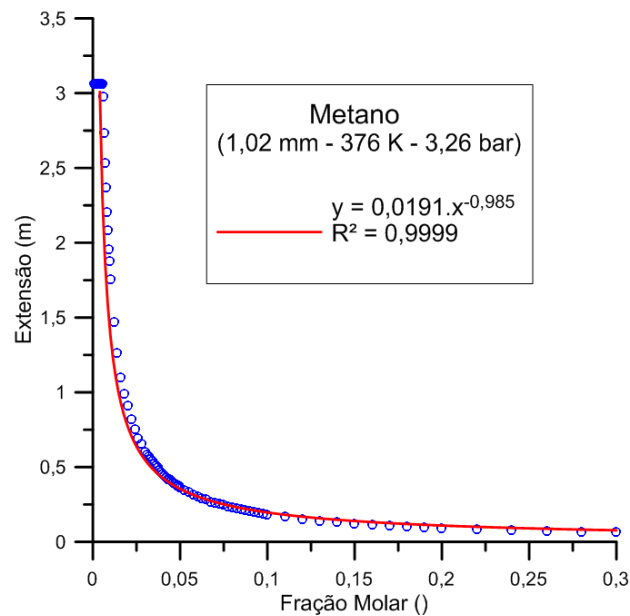
Figura 5.17: Variação da Extensão com a taxa de liberação de metano – 100 casos de vazamento de metano



A Figura 5.17 mostra que os pontos calculados pelo CFD para a extensão no LIE, 50% do LIE e 25% do LIE se ajustam bem a uma função potência de coeficiente aproximadamente 0,5. Isso indica que para diferentes frações molares, as extensões são sempre proporcionais à raiz quadrada da taxa de liberação.

Pode-se verificar que quando a fração molar cai pela metade, a constante que multiplica a raiz quadrada da taxa de liberação dobra. Uma vez que percebida essa relação inversa na Figura 5.17, selecionou-se uma taxa de liberação ao acaso entre os 100 casos simulados para verificar tal comportamento para diferentes frações molares. Conforme Figura 5.18.

Figura 5.18: Extensão para diferentes frações molares de metano

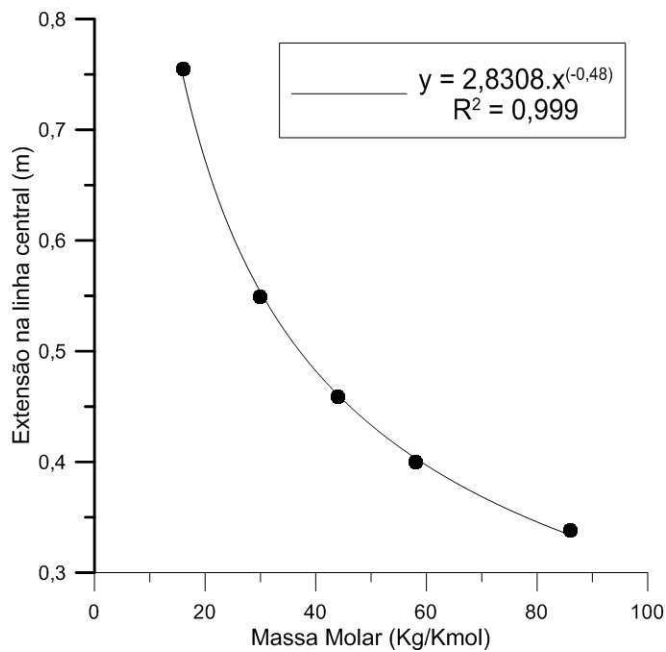


O gráfico da Figura 5.18 confirma a relação inversa entre a extensão e a fração molar, dado os pontos simulados terem se ajustado bem a uma equação potência de fator igual a aproximadamente -1. Isso indica que para uma dada taxa de liberação, a extensão varia inversamente à fração molar que representa o LIE de determinado gás.

Outro fator que se levou em consideração foi a massa molar do gás. Supondo que as demais propriedades dos gases não tinha influência na capacidade de dispersão do gás, variou-se a massa molar do gás nos seguintes valores: 16, 30, 44, 58, 72, 86, que é a sequência de alcanos de 1 a 6 carbonos em sua estrutura, mantendo-se inalterado as demais propriedades.

Realizou-se a simulação do vazamento a partir de um orifício de 1 mm e temperatura do reservatório de 303,15 K. Os resultados são mostrados no gráfico da Figura 5.19.

Figura 5.19: Variação da extensão com a massa molar



O gráfico da Figura 5.19 demonstra que os pontos gerados pela simulação se ajustam bem a uma equação potencial de coeficiente aproximadamente -0,5. Isto indica que a extensão varia inversamente com a raiz quadrada da massa molar.

As análises feitas até aqui indicam, em síntese, que a extensão varia diretamente com a raiz quadrada da taxa de liberação e inversamente com o LIE e com a raiz quadrada da massa molar. Esta relação pode ser representada por uma equação empírica na forma:

$$Extensão(W, LIE, P_0, T_0, d_e) = K \cdot \frac{\sqrt{\frac{Taxa\ de\ liberação}{massa\ molar}}}{LIE} \quad (40)$$

Com o intuito de propor uma equação simplificada, que fizesse uso apenas das condições do reservatório e diâmetro do orifício, utilizou-se a Equação (15) para determinar a taxa de liberação. Inserindo a Equação (15) na Equação (40), tem-se:

$$Extensão(W, LIE, P_0, T_0, d_e) = K \cdot \frac{\sqrt{m_e = A_e p_0 \left(\gamma \cdot \frac{W}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \right)^{\frac{1}{2}}}}{LIE} \quad (41)$$

Realizando as devidas simplificações matemáticas, chega-se a seguinte expressão:

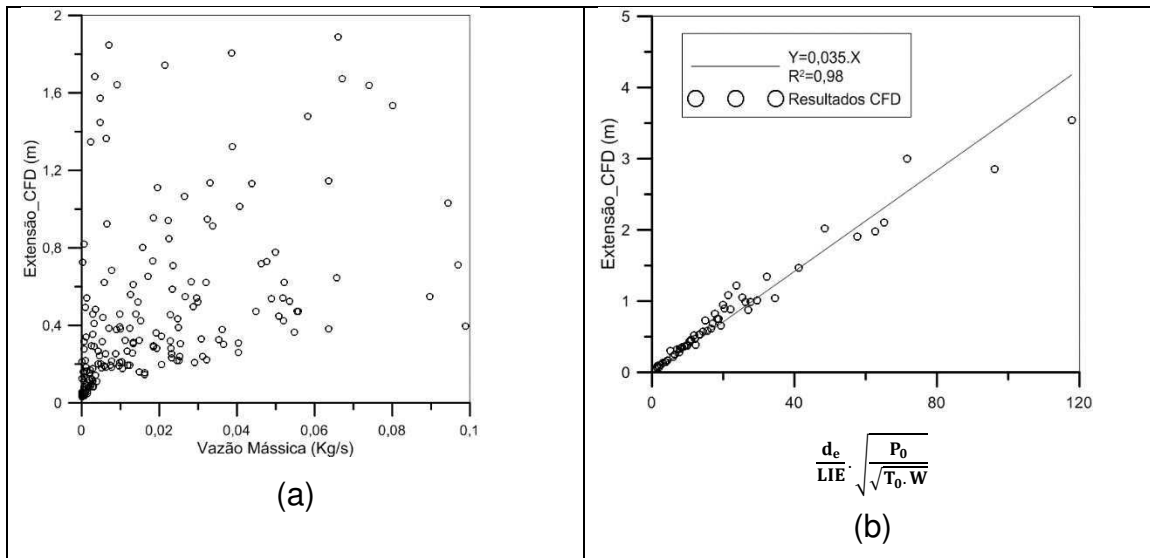
$$Extensão = K \cdot \frac{d_e}{LIE} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sqrt{T_0 \cdot W}}} \quad (42)$$

onde a constante K é dependente do γ de cada gás, de onde se supõe ter uma variação muito pequena entre os gases.

Com a intenção de verificar a reprodutibilidade da relação empírica sugerida pela equação (42), foram realizadas 191 simulações de condições de vazamentos aleatórias para diferentes gases genéricos. Assim, além das condições de pressão, temperatura e diâmetro de vazamento, foram acrescentadas as propriedades do material, que pode representar as propriedades de uma substância ou as propriedades médias de uma mistura. Os intervalos utilizados são descritos na metodologia Tabela 4.2 e utilizou-se a malha 2D para obter os resultados. Todos os parâmetros de entrada e saída dessas simulações encontram-se no Apêndice.

A Figura 5.20(a) mostra a dispersão dos resultados das simulações em CFD em função da taxa de liberação. Diferente do que se observa no padrão de variação da extensão com a taxa de liberação na Figura 5.17, os resultados CFD se mostram completamente dispersos. Isto já era esperado dado que os gráficos da Figura 5.17 foram apenas para o metano, enquanto neste caso, cada simulação, considera um gás ou mistura gasosa diferente, implicando em massas molares, bem como limites inferiores de explosividade, diferentes.

Figura 5.20: Extensões no LIE de diferentes gases



Aplicando-se a expressão da equação (42) no eixo das abscissas (admitindo P_0 em bar e d_e em mm), observa-se na figura 29(b) que os dados CFD se concentram em torno de uma reta com coeficiente angular igual a 0,035. De modo que conclui-se que a constante (K) da expressão da equação (42), assume este valor (para as unidades consideradas), o que fornece a seguinte equação empírica, considerada válida para o amplo intervalo de condições simuladas:

$$Extensão = 0,035 \cdot \frac{d_e}{LIE} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{T_0 \cdot W}} \quad (43)$$

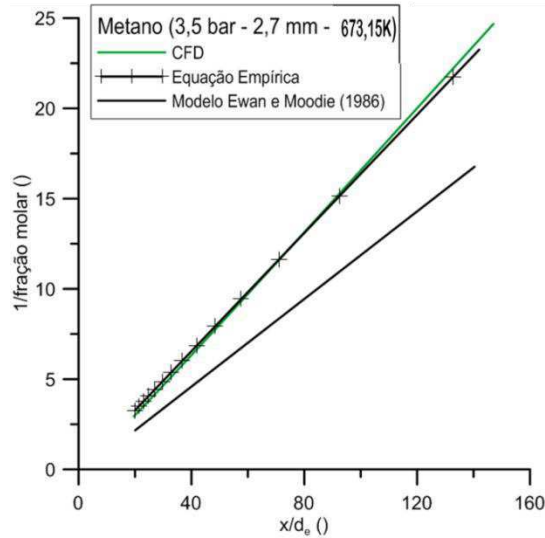
Convertendo a correlação para aplicar-se os valores dos parâmetros de entrada no SI, a equação assume a forma:

$$Extensão = 0,11 \cdot \frac{d_e}{LIE} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{T_0 \cdot W}} \quad (44)$$

Aplicando-se as condições do experimento utilizado para validação, porém admitindo-se que a temperatura no reservatório não era a ambiente, mas sim, de 400°C, a análise feita na Figura 5.16 já havia mostrado que o CFD calculou menores extensões que a correlação simplificada de Ewan e Moodie (1987), evidenciando que a temperatura do reservatório, não levada em consideração na correlação do referido autor, exercia influência que não poderia ser desconsiderada. Aplicando a equação (43), substituindo o LIE pelas frações molares ao longo da linha central e determinando as extensões,

como sendo a posição em que o jato alcance àquela fração considerada, traçou-se novo gráfico, mostrado na Figura 5.21, em que se percebe que a equação empírica conseguiu reproduzir o comportamento previsto pelo CFD.

Figura 5.21: Reprodução do resultado CFD pela equação empírica



Interpretando-se a expressão da equação (43), percebe-se que a extensão varia diretamente com o diâmetro do orifício, diretamente com a pressão do reservatório elevado a 0,5, e inversamente com a temperatura e massa molar elevados as 0,25. Isto mostra que a equação empírica desenvolvida é coerente com o observado e discutido nos gráficos da Figura 5.16 e da análise de sensibilidade da Figura 5.1, onde se destaca a maior contribuição, para extensão da atmosfera explosiva, do diâmetro do orifício, seguido da pressão e por último temperatura do reservatório.

A variação de resultados observada em torno do comportamento linear se deve, provavelmente, pela influência das outras propriedades físicas dos gases, não consideradas na equação, sobretudo a capacidade calorífica que fornece o valor do coeficiente de poison (γ). Porém, para o trabalho de classificação de áreas, em que se trabalha com fatores de segurança generosos, entende-se que esta variação não impacta em riscos que requeiram maior atenção, de modo que a equação empírica desenvolvida, por sua simplicidade e reprodutibilidade de resultados CFD confiáveis, se mostra útil, do ponto de vista prático, para este fim.

Considerando a praticidade e maior confiabilidade de um modelo para determinar a extensão da atmosfera explosiva que leve em consideração os efeitos da dispersão gasosa, o guia italiano, CEI 31-35, admitiu o uso de uma equação para calcular a extensão da área perigosa (d_z), considerando a distância da fonte, ao longo da linha central do jato, até que a concentração do gás fosse reduzida até o LIE do gás. Esta fórmula foi desenvolvida por Tommasini *et.al.* (2013), e é usada para calcular extensões de atmosferas explosivas. A mesma é representada pela equação (45):

$$d_z = 5,2 \cdot (P_0 \cdot S)^{0,5} \frac{k_z}{k_{dz} \cdot LIE} \cdot W^{-0,4} \quad (45)$$

Onde:

- S é a seção transversal da fonte de vazamento = $4 \cdot \pi \cdot d_e^2$ (m²)
- k_z é um coeficiente de correção para contabilizar a concentração do gás no ambiente. No caso de ambiente aberto, $k_z = 1$
- k_{dz} é um coeficiente de segurança aplicado ao LIE.

Comparando-se a Equação (45) com a Equação (44), percebe-se a previsão de mesma relação de dependência entre a extensão com o diâmetro do orifício e com a pressão do reservatório. A relação inversa com a massa molar do gás também foi prevista, porém com um fator de potência maior na Equação (45). A Equação (45), no entanto, não prevê influência da temperatura do reservatório.

5.7 Influência da direção do vazamento na forma da nuvem de atmosfera explosiva

Uma vez que um vazamento pode se dar em qualquer direção, é usual assumir-se que a área classificada é uma região delimitada por uma esfera de raio igual à extensão, com sua fonte de liberação no centro desta esfera, conforme defende Miranda (2013). Assumindo essa suposição, entende-se que

a geometria regular de uma esfera sugere que a extensão em todas as possíveis direções de vazamento possui igual alcance.

No entanto, considerando a presença de vento, a variação na direção do vazamento faz com que o mesmo seja submetido a diferentes contribuições de ventilação, que hora pode estar a favor, hora contra, hora cruzado ao vazamento. Mesmo raciocínio se faz quanto à variação na direção do vazamento em relação à direção da gravidade.

Desta maneira as diferentes direções de vazamento podem fornecer diferentes extensões e volumes da nuvem. A relação entre o volume e a extensão da nuvem define a forma da mesma que, neste trabalho, defende-se estar diretamente relacionado à dimensão do risco de ignição em uma área perigosa.

Para tanto, simulou-se o vazamento contra, a favor e perpendicular ao vento (representando o vento cruzado); bem como vazamento contra, a favor e perpendicular à gravidade, assim como descrito esquematicamente na metodologia (*vide* Tabela 4.3).

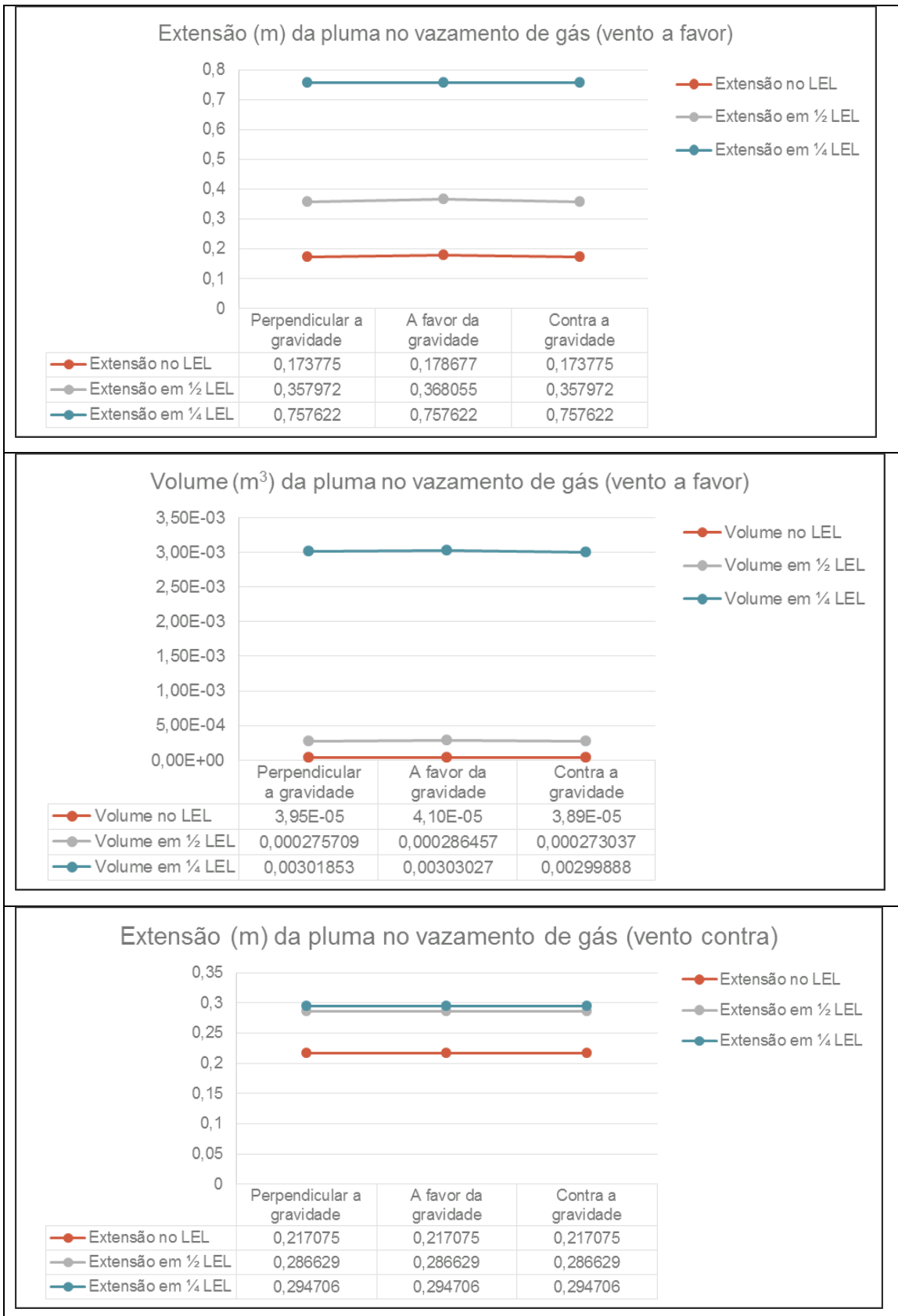
Para tais simulações, assumiu-se um caso base de vazamento de metano com pressão e temperatura do reservatório de 4 bar e 303,15 K, respectivamente, a partir de um orifício de 1 mm. Na intenção de deixar mais evidente o suposto efeito do vento, assumiu-se uma condição de velocidade do vento considerada alta, de 5 m/s.

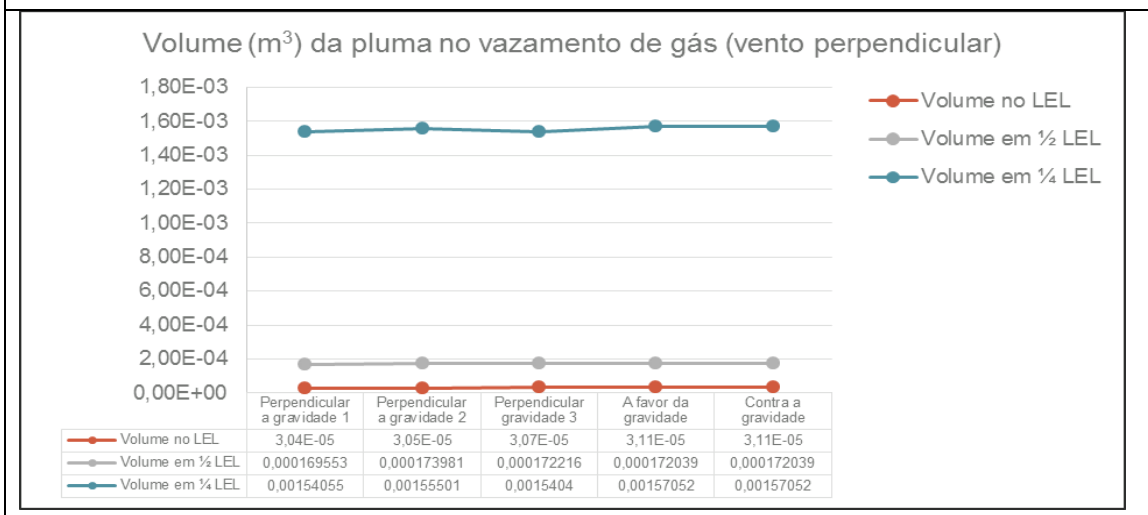
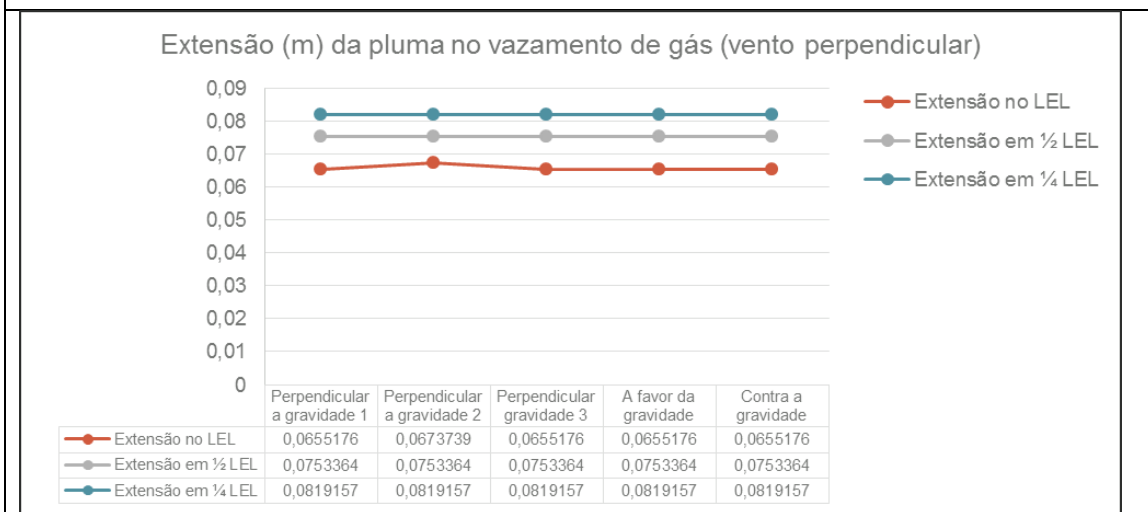
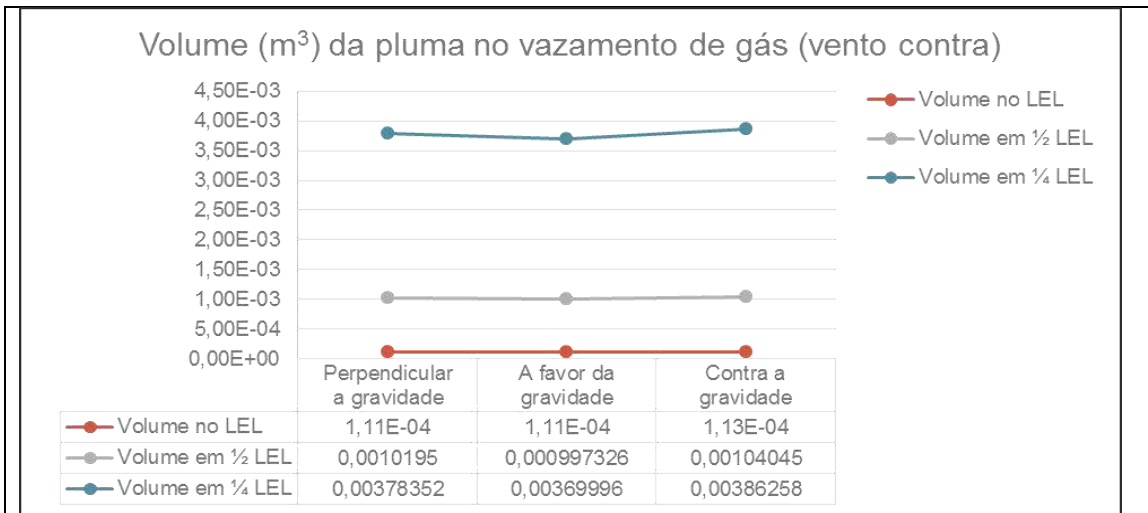
Utilizando uma malha intitulada de 3D, conforme descrição da metodologia, investigou-se, inicialmente, a influência da gravidade na extensão e volume da nuvem, em diferentes direções de vazamento, quais sejam:

- a) Vazamento a favor do vento
- b) Vazamento contra o vento
- c) Vazamento perpendicular ao vento (vento cruzado)

Os resultados podem ser verificados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Influência da gravidade na extensão e volume da nuvem de metano

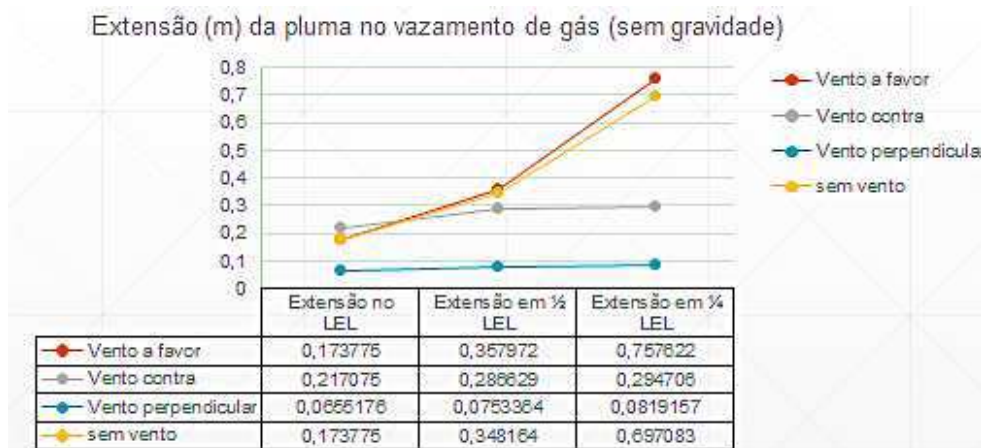




Como percebe-se, os gráficos presentes na Tabela 5.4 são praticamente retas, o que indica que não há variação da extensão, nem do volume no LIE, em 50% do LIE e em 25% do LIE, de onde pode-se concluir que para vazamento sob altas pressões (acima da pressão crítica), a gravidade não interfere nos resultados de interesse para classificação de área.

A influência do vento nas extensões da nuvem pode ser verificada na Figura 5.22. A condição considerada “sem vento” é uma condição quiescente.

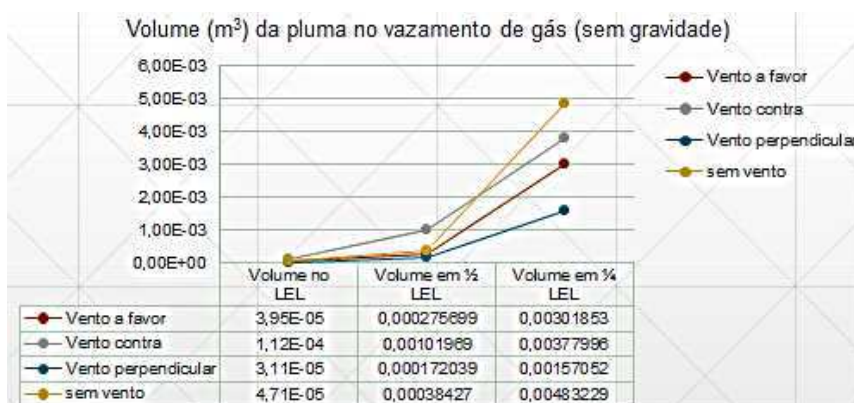
Figura 5.22: Influência do vento na extensão da nuvem de metano



A Figura 5.22 mostra que o alcance da nuvem quando a emissão é a favor do vento é tão grande quanto à extensão da condição sem vento (quiescente). Enquanto que o alcance da nuvem quando a emissão é contrária ao vento é reduzida.

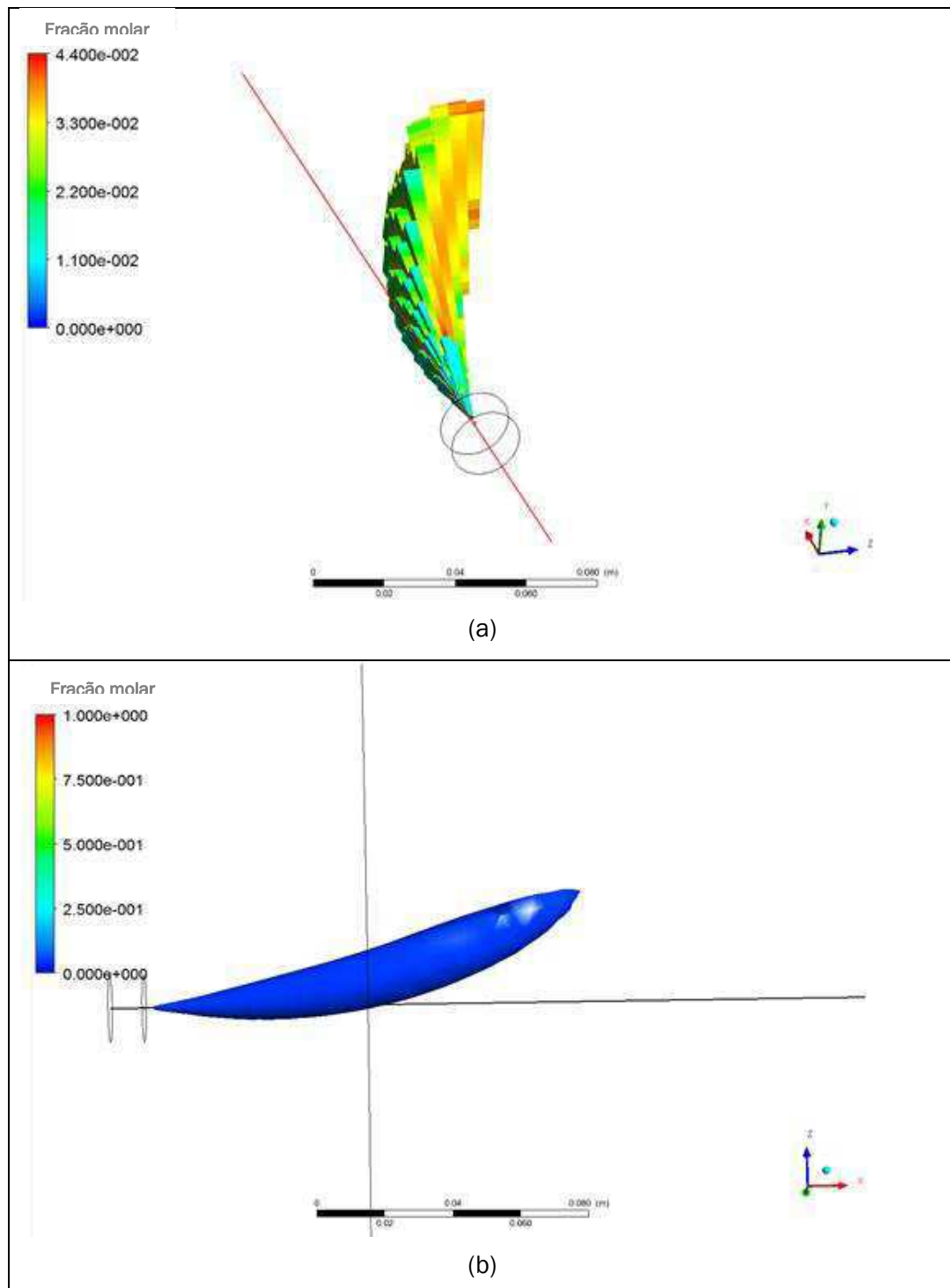
A Figura 5.23 mostra o volume da nuvem até que seus contornos atinjam o limite inferior de explosividade (LIE) e suas frações (50 e 25% do LIE). Em geral, a condição sem vento (quiescente) promove um maior volume da nuvem se comparado às condições ventiladas. Este resultado é coerente, uma vez que se espera que a ventilação favoreça a dispersão da nuvem. Entre as condições ventiladas, o vento contra promoveu um maior volume.

Figura 5.23: Influência do vento no volume da nuvem de metano



Em relação ao vento cruzado, percebe-se que o valor registrado para extensão é o ponto que a nuvem desvia do eixo (que representa a linha central da direção da emissão gasosa), conforme Figura 5.24 (em que foi considerada a direção do vazamento no eixo x, gravidade no eixo y e a direção do vento no eixo z).

Figura 5.24: Influência do vento cruzado na forma da nuvem de metano

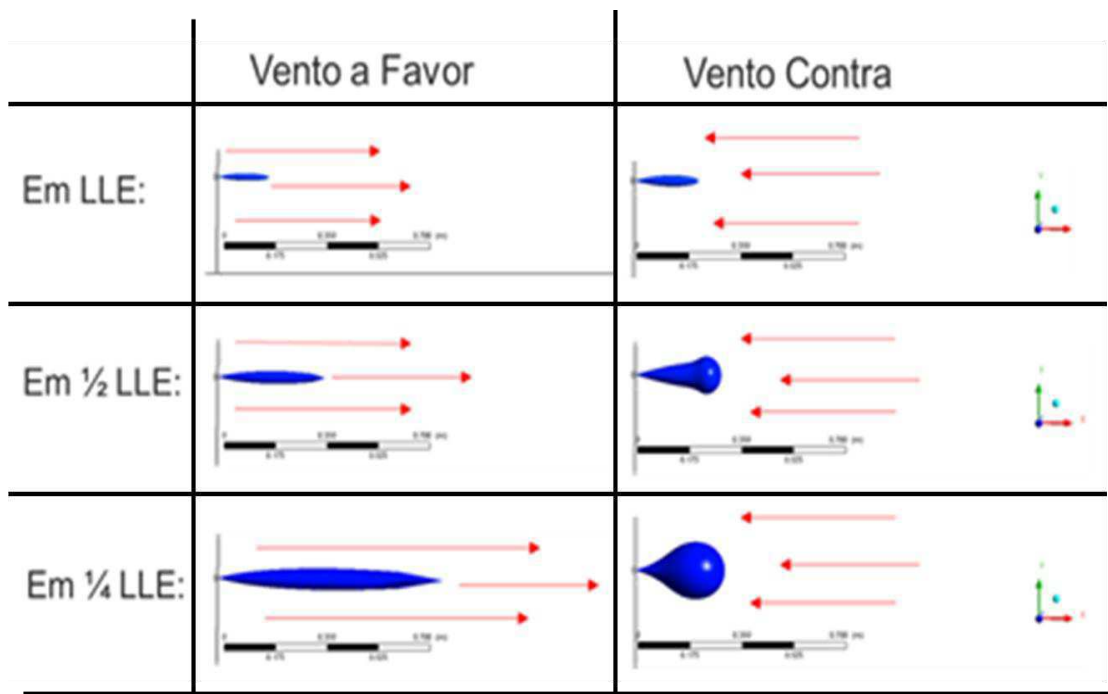


A Figura 5.24 (a) representa o volume dos elementos de malha onde são calculados valores acima ou iguais ao LIE e a Figura 5.24 (b) representa a forma da *isosurface* com fração molar igual ao LIE, de onde a partir daí os gases, pelo fenômeno da dispersão, se encontram em frações menores que o LIE.

Ainda tratando do efeito de vento cruzado, verifica-se na Figura 5.23 que a nuvem apresenta menor volume, em comparação com vento a favor e vento contra. Desta forma, atenção maior foi dada a condição de vento a favor (maior extensão) e vento contra (maior volume).

A Figura 5.25 mostra as *isosurfaces* da nuvem no LIE, em 50% do LIE e em 25% do LIE, de onde pode-se visualizar a evolução de volume e extensão, através da forma da nuvem representativa da atmosfera explosiva.

Figura 5.25: Forma da Nuvem representativa da atmosfera explosiva



Analisando a forma das nuvens, assumindo um fator de segurança igual a 25% do LIE, dois pontos merecem destaque:

- a) O menor volume da nuvem quando o vazamento é a favor do vento, não implica em menor extensão. Pelo contrário, ficou claro que em pontos tão distantes quanto na condição sem vento, ainda se encontra material

inflamável em concentrações perigosas. Por mais que o menor volume da nuvem indique um menor risco em relação à condição sem vento, este risco não pode ser negligenciado, pelos critérios da norma.

- b) O maior volume encontrado quando o vazamento é contra o vento, acontece em uma menor extensão. A relação de maior volume em menor extensão indica que existe uma maior concentração de material inflamável e, conseqüentemente, maior risco de ignição nessa região. Uma generalização da classificação da área perigosa tomando-se como base o volume encontrado na condição sem vento pode estar negligenciando esse maior risco em torno da fonte.

A norma IEC 60079-10, ao analisar o grau de ventilação, o faz em relação ao volume hipotético da atmosfera explosiva (V_z); de forma que um volume pequeno (menor que $0,1 \text{ m}^3$ ou 1% do volume do ambiente) indica que o ambiente é bem ventilado, classificando a área considerando o baixo risco de ignição e chegando a assumir, nos casos de fontes de liberação secundária, extensão desprezível ou mesmo área não classificada.

Diversos autores, citados na revisão bibliográfica (IVING, 2008, WEBBER, 2011, SANTON, 2012, THOMMASINI *et.al.*, 2013, MIRANDA, 2013), questionam e desenvolvem trabalhos para estimar com maior fidelidade o V_z , concluindo que a norma superestima o cálculo desse volume, o que a torna bastante conservadora. No entanto, utilizam o método da norma para classificar área a partir do valor do V_z que consideram mais confiável, uma vez que sua determinação passa a ter base científica.

A preocupação é que ao desconsiderar o efeito da direção do vento na forma da nuvem, a norma, e os autores que a aplicam substituindo apenas o cálculo do V_z (por valor mais confiável), não considera a possibilidade de uma extensão alta para um volume pequeno em vazamentos a favor do vento, e tampouco consideram um risco maior, próximo à fonte, devido possibilidade de vazamento contra o vento, que promove um maior volume com menor alcance.

Dito posto, os resultados apresentados e discutidos até aqui, através de modelo CFD validado e coerente com o pressuposto teórico da dispersão gasosa sob altas pressões, demonstram que o uso da metodologia da norma, através dos critérios aplicados ao V_z , por avaliar apenas o volume da atmosfera explosiva, sem considerar adequadamente seu alcance, pode levar a uma falsa impressão de segurança, dando margem a interpretação errônea e, portanto, incorrendo em situação de risco.

5.8 Proposta de método para classificação de área

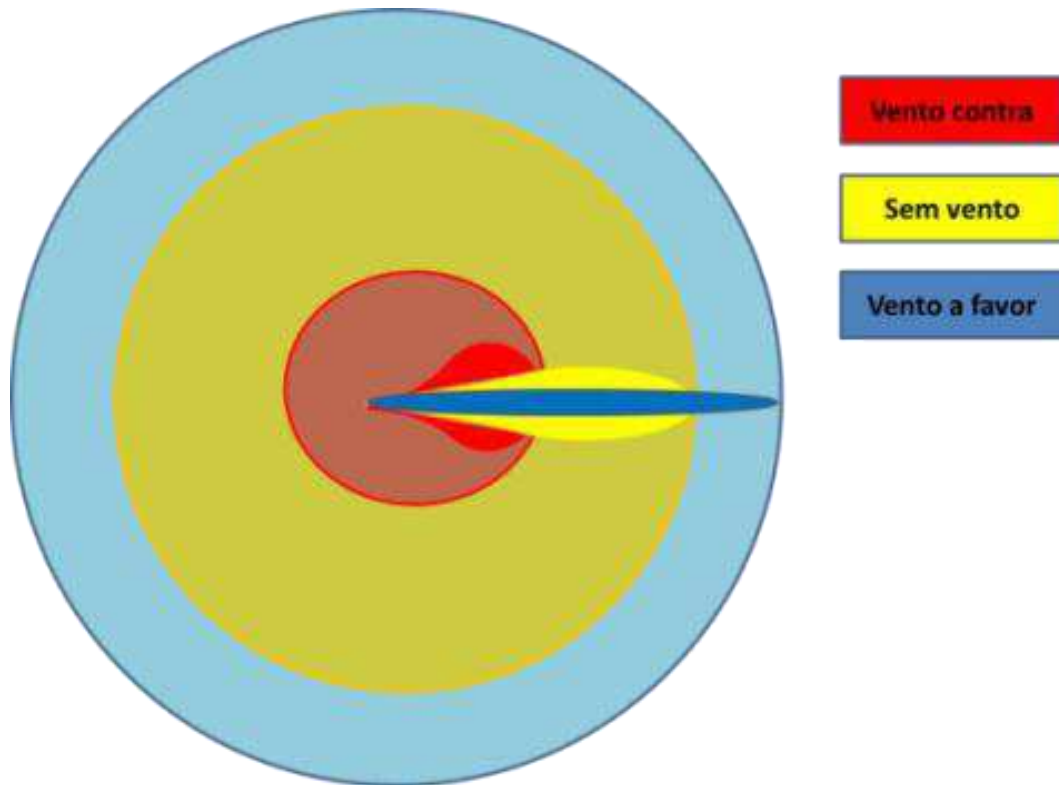
Como já exposto, o padrão normativo IEC 60079-10, não considera o efeito da dispersão gasosa, alicerçando sua metodologia na teoria da ventilação. Assim, para uma determinada fonte de liberação estabelecida, a norma IEC 60079-10 considera apenas a determinação do volume V_z para definir o grau de ventilação, e, assim, classificar a zona perigosa, não prevendo e desconsiderando a influência do alcance do volume na avaliação do risco.

No entanto, os resultados deste trabalho mostram que, o alcance da nuvem não está diretamente relacionado ao seu volume e que mesmo em situações de boa disponibilidade de ventilação em todo o ambiente, o risco de ignição em determinada região é diferenciado a depender da direção do vento; o que sugere a ocorrência de outros tipos de zona na área classificada, dado que não se pode prever a direção do vazamento em relação à direção do vento no momento do vazamento.

Defende-se, neste trabalho que calcular o V_z levando em consideração o efeito da dispersão e aplicar em uma padrão normativo de classificação de área que não considera esse efeito, é um contrassenso.

Enquanto a norma dimensiona o risco de ignição apenas pelo volume da nuvem, definindo o grau de ventilação, aqui defende-se que o risco também depende do alcance da nuvem, de maneira que, assim, passa-se a levar em consideração as variáveis que afetam a dispersão. A Figura 5.26 mostra, esquematicamente, a relação entre volume e extensão da nuvem.

Figura 5.26: Relação volume-extensão da nuvem de metano



A Figura 5.26 mostra uma região central com o maior risco de ignição e a região mais externa com o menor risco. Uma vez considerando-se a variação do risco, ao se analisar a relação volume da nuvem e alcance da mesma, uma proposta de alteração metodológica é, na Tabela 2.1 (usada para classificação de área), substituir “grau de ventilação” por “grau de dispersão” (em que a ventilação é uma de suas variantes), conforme Tabela 5.5.

Ao invés de avaliar o grau de ventilação comparando o volume V_z ao volume do ambiente, a proposta é avaliar o grau de dispersão, comparando o volume V_z (calculado até o LIE multiplicado pelo fator de segurança apropriado) ao volume da esfera de raio igual ao alcance da nuvem (extensão até o LIE). O critério para definir o fator de segurança seriam mantidos.

Tabela 5.5: Proposta de Classificação de Área alternativa

| | Dispersão | | | | | | |
|------------------------|-------------------------------|--------------|-----------|--------|-----------------|-----------------|----------------------------|
| Grau da fonte de risco | Grau | | | | | | |
| | Alto | | | Médio | | | Baixo |
| | Disponibilidade de ventilação | | | | | | |
| | Boa | Satisfatória | Pobre | Boa | Satisfatório | Pobre | Boa, Satisfatório ou Pobre |
| Contínuo | Zona 0 RD | Zona 0 RD | Zona 0 RD | Zona 0 | Zona 0 + Zona 2 | Zona 0 + Zona 1 | Zona 0 |
| Primário | Zona 1 RD | Zona 1 RD | Zona 1 RD | Zona 1 | Zona 1 + zona 2 | Zona 1 + zona 2 | Zona 1 |
| Secundário | Zona 2 RD | Zona 2 RD | Zona 2 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 2 | Zona 1 ou mesmo zona 0 |

Em relação à Tabela 2.1 (produzida em similaridade à Tabela B.1, encontrada na norma), a sigla ED (extensão desprezível) foi substituída por RD (risco desprezível), de forma a deixar claro a necessidade de ainda classificar a área na extensão calculada.

Adotando lógica semelhante para avaliar o grau de ventilação, a avaliação do grau de dispersão assume, nesta proposta, o seguinte critério (onde V_e é o volume da esfera de raio igual à extensão até que a nuvem atinja concentração igual ao LIE):

$$\text{Alto: } V_z \leq 1\%V_e$$

$$\text{Médio: } 1\% < V_z < V_e$$

$$\text{Baixo: } V_z \geq V_e$$

Para determinação da extensão da área classificada, faz-se uso da equação (43), desenvolvida pelo CFD validado e adequada para este fim.

5.9 Aplicação de método alternativo para classificação de área

A fim de exemplificar a aplicação do método proposto, comparou-se a classificação de área em duas condições: quiescente (sem vento) e com ventilação (controlada em 5 m/s). Para todos os casos, considerou-se dispersão em ambiente aberto, sem impedimento ($f = 1$), a partir de fonte de liberação de risco secundário. Supondo-se um caso real, em que não tem como prevê a direção do vazamento, em relação à ventilação imposta, considerou-se as duas possibilidades limites para ventilação (vento contra e vento a favor). O comparativo entre os padrões, também inclui uma classificação de área, apenas substituindo o volume V_z calculado pela norma pelo volume da *isosurface* (como sugere trabalhos recentes, mencionados).

A seguir é apresentado memória de cálculo para determinação do tipo da zona e extensão da área classificada, seguindo o guia da norma brasileira ABNT NBR IEC 60079-10:1, para o caso de vazamento de metano condição quiescente:

$P_0 = 4 \text{ bar}$; $T_0 = 303,15 \text{ K}$; $d_e = 1 \text{ mm}$; $W = 16,04 \text{ kg/kmol}$; $LIE = 0,044$; $\gamma = 1,35$

$$V_z = \frac{m_e}{q_a \cdot K \cdot LIE_m} \cdot V_0$$

$$m_e = A_e p_0 \left(\gamma \cdot \frac{W}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$m_e = 0,0005 \text{ kg/s}$$

$$q_a = 0,5(\text{m/s}) \times (15 \times 15)(\text{m}^2) = 112,5 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K = 0,5 \text{ (por ser fonte secundária)}$$

$$LIE_m = 0,416 \cdot 10^{-3} W \cdot LIE_{V\%} = 0,03 \text{ kg/m}^3$$

$$V_0 = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ m}^3$$

$$V_z = 1 \text{ m}^3$$

Sendo maior que $0,1 \text{ m}^3$, o grau de ventilação é considerado moderado e a área é classificada como **zona 2** (conforme Tabela 2.1). Considerando a prática usual de estimar a extensão da zona pelo raio da esfera de volume igual ao V_z , temos:

$$\text{Extensão estimada} = (V_z \cdot 3 / (4 \cdot \pi))^{1/3} \rightarrow \text{Extensão da zona} = \mathbf{0,62\text{m}}$$

A seguir é apresentado memória de cálculo para determinação do tipo da zona e extensão da área classificada, seguindo a proposta de classificação de área deste trabalho, para o caso de vazamento de metano condição quiescente:

$$P_0 = 4 \text{ bar}; T_0 = 303,15 \text{ K}; d_e = 1 \text{ mm}; W = 16,04 \text{ kg/kmol}; \text{LIE} = 0,044; \gamma = 1,35$$

De acordo com a proposta, primeiro se calcula a extensão da atmosfera explosiva

$$\text{Extensão} = 0,035 \cdot \frac{d_e}{\text{LIE}} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sqrt{T_0 \cdot W}}}$$

$$\text{Extensão da zona} = \mathbf{0,19 \text{ m}}$$

Calculando o volume da esfera com raio igual a extensão da atmosfera explosiva, e aplicando critério proposto:

$$V_e = (4/3) \cdot \pi \cdot (0,19)^3$$

$$V_e = 0,028 \text{ m}^3$$

$$V_z = V_{\text{iso}} \text{ em } \text{LIE}/2 \text{ (fator de segurança para fonte secundária)}$$

$$V_z \text{ (CFD)} = 0,00038 \text{ m}^3$$

$$(V_z/V_e) \cdot 100\% = \mathbf{1,36\%}$$

Sendo que o V_z é maior que 1% de V_e considera-se dispersão médio e a área é classificada como **zona 2**.

O método da norma em relação ao método alternativo proposto estima uma extensão cerca de três vezes maior, se mostrando bastante conservadora. Em se tratando de classificação da área, ambas classificam como zona 2. Se usar o volume da *isosurface* como estimativa para V_z , percebe-se um volume mais de duas mil vezes menor que o V_z calculado pela norma. Aplicando este volume ao método da norma, a classificação indicaria extensão desprezível.

Realizou-se o estudo de caso para condição de vazamento contra o vento. A memória de cálculo do procedimento estipulado como a norma é como segue:

$P_0 = 4 \text{ bar}$; $T_0 = 303,15 \text{ K}$; $d_e = 1 \text{ mm}$; $W = 16,04 \text{ kg/kmol}$; $LIE = 0,044$; $\gamma = 1,35$

$$V_z = \frac{m_e}{q_a \cdot K \cdot LIE_m} \cdot V_0$$

$$m_e = A_e p_0 \left(\gamma \cdot \frac{W}{RT_0} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$m_e = 0,0005 \text{ kg/s}$$

$$q_a = 5(\text{m/s}) \times (15 \times 15)(\text{m}^2) = 1125 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$K = 0,5 \text{ (por ser fonte secundária)}$$

$$LIE_m = 0,416 \cdot 10^{-3} W \cdot LIE_{V\%} = 0,03 \text{ kg/m}^3$$

$$V_0 = 15 \times 15 \times 15 = 3375 \text{ m}^3$$

$$V_z = 0,1 \text{ m}^3$$

Sendo igual a $0,1 \text{ m}^3$, o grau de ventilação é considerado alto e a área é classificada como **zona 2 de extensão desprezível** (conforme Tabela 2.1).

A classificação de área dessa condição de vento contra, usando a proposta descrita neste trabalho pode ser verificada, para efeito de comparação, na memória de cálculo que segue:

$P_0 = 4 \text{ bar}$; $T_0 = 303,15 \text{ K}$; $d_e = 1 \text{ mm}$; $W = 16,04 \text{ kg/kmol}$; $LIE = 0,044$; $\gamma=1,35$

De acordo com a proposta, primeiro se calcula a extensão da atmosfera explosiva

$$\text{Extensão} = 0,035 \cdot \frac{d_e}{LIE} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sqrt{T_0 \cdot W}}}$$

Extensão da zona = 0,19 m

Calculando o volume da esfera com raio igual a extensão da atmosfera explosiva, e aplicando critério proposto:

$$V_e = (4/3) \cdot \pi \cdot (0,19)^3$$

$$V_e = 0,028 \text{ m}^3$$

$V_z = V_{\text{iso}}$ em $LIE/2$ (fator de segurança para fonte secundária)

$$V_z \text{ (CFD)} = 0,001 \text{ m}^3$$

$$(V_z/V_e) \cdot 100\% = 3,6\%$$

Sendo que o V_z é maior que 1% de V_e considera-se dispersão médio e a área é classificada como **zona 2**.

Uma vez que a norma não faz referência à direção do vento, constata-se que o grau de ventilação alto, faz com que a área seja classificada como zona 2 de extensão desprezível. No entanto, a possibilidade dessa ventilação ser contrária ao vazamento, concentrando uma maior quantidade de material inflamável próximo à fonte, é um risco a ser considerado.

A proposta de classificação defendida neste trabalho consegue prevê esse risco e classifica a área como zona 2, sem negligenciar o risco. O volume da *isosurface* é maior que no caso quiescente, mais ainda chega a ser 100 vezes menor que o volume previsto pela norma, o que leva, assim como na norma, a uma classificação de zona 2 de extensão desprezível, se for usada diretamente para classificação de área usando o guia da norma (Tabela 2.1).

Por fim, a análise do vazamento a favor do vento, utilizando o guia da norma, fornece um resultado exatamente igual ao vento contra, uma vez que a norma não considera a direção do vento. Em relação ao método proposto, segue a memória de cálculo para análise e comparação:

$$P_0 = 4 \text{ bar}; T_0 = 303,15 \text{ K}; d_e = 1 \text{ mm}; W = 16,04 \text{ kg/kmol}; LIE = 0,044; \gamma = 1,35$$

De acordo com a proposta, primeiro se calcula a extensão da atmosfera explosiva

$$\text{Extensão} = 0,035 \cdot \frac{d_e}{LIE} \cdot \sqrt{\frac{P_0}{\sqrt{T_0 \cdot W}}}$$

Extensão da zona = 0,19 m

Calculando o volume da esfera com raio igual a extensão da atmosfera explosiva, e aplicando critério proposto:

$$V_e = (4/3) \cdot \pi \cdot (0,19)^3$$

$$V_e = 0,028 \text{ m}^3$$

$$V_z = V_{\text{iso}} \text{ em } LIE/2 \text{ (fator de segurança para fonte secundária)}$$

$$V_z = 0,00027 \text{ m}^3$$

$$(V_z/V_e) \cdot 100\% = 0,96\%$$

Sendo que o V_z é menor que 1% de V_e considera-se dispersão alta e a área é classificada como **zona 2 de risco desprezível**. Assim, confirma-se que o vento a favor de fato favorece a dispersão.

Destaque aqui é dado à referência que se faz ao método alternativo proposto, de risco desprezível, ao invés de extensão desprezível. Desta forma entende-se que diante da impossibilidade de prever a direção do vento, é prudente não desprezar a extensão da zona, mas que dado o risco ser desprezível, pode-se adotar com segurança a extensão da condição quiescente.

Capítulo 6

Conclusão

6.1 Considerações Finais

O modelo de escoamento turbulento, compressível, assumindo a condição ideal, foi capaz de prevê a estrutura do jato oriundo da emissão sônica, de acordo com o pressuposto teórico, sem perda de precisão das respostas de interesse, mesmo em condições de desvio de idealidade. A reprodutibilidade do modelo foi evidenciada na validação por resultados experimentais para o vazamento de metano e etileno em altas pressões, disponíveis na literatura.

A parametrização da geometria e malha do domínio de cálculo, permitiu que o domínio se adequasse a diferentes diâmetros de vazamento, sendo viável até mesmo para diâmetros muito pequenos (0,1 mm). A definição das condições de vazamento e propriedades do gás como parâmetros de entrada permitiram o planejamento experimental e aplicação automatizada, sem a necessidade de atualizar o *setup* a cada simulação. As expressões desenvolvidas para serem parâmetros de saída retornaram de forma prática os resultados de interesse para a atividade de classificação de área. Por fim, conclui-se que todo o processo de parametrização viabilizou a análise de um extenso número de casos de vazamento simulados, para condições e propriedades dos gases aleatórios, conferindo representatividade do universo de possibilidades.

A equação desenvolvida fornece uma via prática para determinação de extensão de atmosfera explosiva, dispensando o uso do *software* e/ou futuro esforço computacional para este fim. Uma vez que a equação desenvolvida foi capaz de prever, dentro de uma margem de erro aceitável, os resultados CFD das extensões de 200 casos de vazamentos aleatórios para gases genéricos, conclui-se que a mesma é confiável para aplicação em classificação de área de atmosfera explosiva.

A proposta de classificação de área, neste trabalho, considera o maior risco oriundo dos possíveis efeitos da direção do vento na dispersão gasosa. Para tanto foi demonstrado que o risco a ser considerado para classificar a

área perigosa deve relacionar o volume da atmosfera explosiva com seu alcance e que essa relação é alterada pela direção do vento.

Ao considerar-se os efeitos da dispersão, conclui-se que a alteração proposta no método da norma torna a classificação de área mais segura, evitando estimativas excessivamente conservadoras, bem como falsa impressão de segurança, na atividade de classificação de área.

Uma vez que a própria norma sugere a implementação de modelos computacionais via computação fluidodinâmica (CFD) e aplicação de normas complementares específicas, conclui-se que a proposta, além de atender aos requisitos de segurança, também atende aos requisitos legais, sendo bastante útil, principalmente para aplicações em unidades que operam em condições bastante severas de pressão e temperatura, em ambiente aberto.

6.2 Sugestões de trabalhos futuros

Estudo da inclusão da variável velocidade e direção do vento no ambiente, no uso da técnica estatística de amostragem multidimensional (Latin Hipercubo), a fim de desenvolver uma correlação para estimativa do volume da nuvem representativa da atmosfera explosiva, a partir de novas simulações que levem em consideração esta variável.

Determinação de um número ótimo de simulações para representação do universo de possibilidades, através de técnicas como máxima entropia, viabilizando a verificação de influências de um maior número de parâmetros sem perda de representatividade.

Desenvolvimento de casos de vazamento de líquidos e de gases liquefeitos que por despressurização evaporam, implicando em um escoamento bifásico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR IEC 60079. **Atmosferas Explosivas Parte 10-1: Atmosferas explosivas de gás**:2009

ANSYS CFX-Solver Theory Guide, **ANSYS CFX Release 11.0**, ANSYS, Inc. Southpointe, Canonsburg, 2006.

ANTONIA, R. A., PRABBU, A., STEPHENSON, S. E. **Conditionally sampled measurements in a heated turbulent jet**. Fluid Mechanics Journal, 27, 455, 1975.

BECKER, H. A., HOTTEL, H. C., WILLIAMS, G. C., **The nozzle fluid concentration field of the round turbulent jet**. Fluid Mechanics Journal, 88, 431, 1967.

BENINTENDI, R., *Turbulent jet modelling for hazardous area classification*, **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Volume 23, Issue 2, 2010, Pg 373-378.

BIRCH, A. D., BROWN, D. R., DODSON, M. G., SWAFFIELD F., **The concentration field of a methane jet**. Fluid Mechanics Journal, 88, 432, 1978.

BIRCH, A. D., BROWN, D. R., DODSON, M. G., SWAFFIELD F., **Studies of flamability in turbulent flows using laser Raman spectroscopy**. 17th Symposium (International) on combustion. The combustion Institute, p. 307, 1979.

BIRCH, A. D., BROWN, D. R., DODSON, M. G., SWAFFIELD F., **The structure and concentration decay of high pressure jets of natural gas**. Combustion Science Technology, 36: 249-61, 1984

BIRCH A. D., HUGHES, D. J., SWAFFIED, **Velocity decay of high pressure jets**. Combustion Science Technology, 52: 161-71, 1987

BONELLI, Francesco; VIGGIANO, Annarita; MAGI, Vinicio. *A Numerical Analysis of Hydrogen Underexpanded Jets Under Real Gas Assumption*. **Journal of Fluids Engineering**, v. 135, n. 12, p. 121101, 2013.

BRITTER, R. E. **Dispersion of two-phase flashing releases – FLADIS field experiment**. Cambridge Environmental Research Consultants report FM89/2 to the Commission of the European Communities DG XIII, 1994.

CHEN, C. J., RODI, W. (1980). **Vertical turbulent buoyant jets – a review of experimental data**. In *The Science and Applications of Heat and Mass Transfer*, Pergamon Press. Vol 4, 1980.

De NEVERS, N. **Fluid Mechanics**, Addison-Wesley Publishing, Massachusetts USA, 1970.

ERTHAL, L., **Atmosferas potencialmente explosivas: um estudo e caso como contribuição para classificação de áreas na atividade para indústria do petróleo, química e petroquímica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). UFF, RJ, 2004.

EWAN, B. C. R. & MOODIE, K., **Structure and Velocity Measurements in Underexpanded Jets**, *Combustion Science and Technology*, Vol 45, p. 275-288, 1986.

HILL, P. G., PETERSON, C. R., **Mechanics and Thermodynamics of Propulsion**. Addison- Wesley, 2009

IVINGS, M. J., GANTS, S. E., **CFD Modelling of Low Pressure Jets for Area Classification**. Health & Safety Laboratory report HSL/2005/11, Buxton, UK, 2008.

JORDÃO, D. M., **Manual de Instalações Elétricas em Indústrias Químicas, Petroquímicas e de Petróleo: Atmosferas Explosivas**. 3ª edição. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2002.

KLEINSTEIN, G. **Mixing in turbulent axially symmetric free jets**. *Journal of Spacecraft* 1(4), 403, 1964.

MIRANDA, J. T., CAMACHO, E. M., FORMOSO, J. A. F., GARCÍA, J. D. R., **Comparative study of methodologies based on Standard UNE 60079/10/1 and computational fluid dynamics (CFD) to determine zonal reach of gas-generate Atex explosive atmospheres**, Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Elsevier, Vol. 26, 839-850, 2013

MACMILLAN, Alan, **Electrical Instalations in Hazardous Area**, Elsevier Science LTD, Oxford, United Kingdom, 1998.

OTSUKA, A. H., **Análise quantitativa da Extensão de Áreas Classificadas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2012.

PAPANIKOLAOU, E., BARALDI, D., KUZNETSOV, M., VENETSANOS, A., **Evaluation of notional nozzle approaches for CFD simulations of free-shear under-expanded hydrogens jets**. Hydrogen Energy. Elsevier, 37: 18563-18574, 2012.

RATHAKISHNAN, E., Gas dynamics, Prentice-Hall, 5a Ed., 2006.

SANTON, R., IVINGS, M., WEBBER, D., KELSEY, A., **New Methods for Hazardous Area Classification for Explosive Gas Atmosphere**. Hazard XXIII Symposium Series No 158. Pag 339 – 346, 2012.

SCHEFER, R. W., HEUFF, W. G., WILLIAMS, T. C., BROWN, B. COLTON, J., **Characterization of High Pressure Underexpanded Hydrogen Jet Flames**. Int. Hydrogen Energy. 2007, 32: 208-93.

SEGELER, C. G., **Gas Engineers Handbook**, ISBN: 9780831133870, 2005.

SHAUGHNESSY, E. J., MORTON, J. B., **Laser light-scattering measurements of particle concentration in a turbulent jet**. Fluid Mechanic Journal, 80, 129, 1977.

SISSOM, L. E. & PITTS, D. R. **Fenômenos de Transporte**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1988.

SMITH, T. B., **Area Classification – Past, Present and Future.**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-16, No. 2, 1980

SUZUKI, H., ENDO, M., SAKAKIBARA, Y., **Structure and Oscillation of Underexpanded Jet.** Scientific Research: Open Journal of Fluid Dynamics, Vol. 3, pag. 85-91, 2013

THOMMASINI, R., PONS, E., PALAMARA, F., **Area Classification for Explosive Atmospheres: Comparison between European and North American Approaches.**, Industry Applications Society 60th Annual IEEE, pp. 1-7, 2013

VALLVÉ, L. L. D., VILCHEZ, J. A., **Simulación de Atmosferas Explosivas mediante CFD,** Universitat Politècnica de Catalunya, Espanha, 2007.

WEBBER, D.M., IVINGS, M.J., and SANTON, R.C., **Ventilation theory and dispersion modelling applied to hazardous area classification,** Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Volume 24, 2011, Pg 612–621, 2011

WIDIATMOJO, A., *et al.*, **Predicting gas dispersion in large scale underground ventilation: A particle tracking approach.** Building and Environment, ELSEVIER, 95, 171 – 181, 2016.

WILSON, R. A. M., DANKWERTS, P. V., **Studies in Turbulent Mixing: A hot-air jet.** Chemistry Engineering. Science., 19, 885, 1964.

WYGNANSKY, I., FIEDLER, H. **Some measurements in the self-preserving jet.** Fluid Mechanics Journal, 38, 577, 1969.

YAWS, C. L., **Chemical Properties Handbook.** McGraw-Hill, 1999.

APÊNDICE

a) Simulação de 100 casos de vazamento de Metano

| Simulacao | Diametro (mm) | Temperatura (K) | Pressão (Pa) | Extensao (m) | ExtensaoMeio (m) | ExtensaoQuarto (m) | Volume (m ³) | VolumeMeio (m ³) | VolumeQuarto (m ³) | MFlow (kg s ⁻¹) | ExtensaoBarrel (m) |
|-----------|---------------|-----------------|--------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | 2,197099446 | 454,8434 | 2038575 | 0,665741 | 1,29656 | 2,54864 | 0,00230137 | 0,0178443 | 0,140932 | 0,0112595 | 0,00641089 |
| 2 | 0,346271435 | 509,5712451 | 8144954,622 | 0,188011 | 0,373973 | 0,734095 | 5,44E-05 | 0,000423578 | 0,003343 | 0,000936707 | 0,00193877 |
| 3 | 0,927592214 | 464,122649 | 1344902,446 | 0,231382 | 0,450699 | 0,902201 | 9,80E-05 | 0,000769678 | 0,005884 | 0,00138913 | 0,0022243 |
| 4 | 1,372809807 | 552,5982969 | 8378031,51 | 0,724967 | 1,42772 | 2,80053 | 0,00320735 | 0,0242501 | 0,196286 | 0,0145986 | 0,00768634 |
| 5 | 0,704398457 | 487,3430388 | 4800520,207 | 0,306271 | 0,596337 | 1,18339 | 0,000227633 | 0,00181892 | 0,013446 | 0,00242095 | 0,00309262 |
| 6 | 0,583475136 | 450,0478541 | 4710686,016 | 0,260838 | 0,507868 | 1,00358 | 0,000140609 | 0,00112354 | 0,008156 | 0,00169049 | 0,00248407 |
| 7 | 2,351177461 | 501,2498713 | 5138521,035 | 1,02229 | 2,04651 | 4,04403 | 0,00898398 | 0,0705498 | 0,51956 | 0,0284186 | 0,0106444 |
| 8 | 0,608236841 | 457,8499488 | 6806242,796 | 0,321204 | 0,632566 | 1,2408 | 0,000262647 | 0,00210891 | 0,016619 | 0,00256451 | 0,00311058 |
| 9 | 1,961275774 | 496,0567414 | 6273529,783 | 0,952946 | 1,90759 | 3,6872 | 0,00708598 | 0,0552906 | 0,445938 | 0,0238806 | 0,00973032 |
| 10 | 1,020289009 | 376,1090383 | 3263437,008 | 0,41965 | 0,817121 | 1,63246 | 0,000576472 | 0,00467888 | 0,035586 | 0,00400267 | 0,00371863 |
| 11 | 1,251515447 | 348,452874 | 5469035,769 | 0,679521 | 1,35164 | 2,60315 | 0,00248451 | 0,019986 | 0,15447 | 0,0100229 | 0,00584197 |
| 12 | 0,870068951 | 493,1629379 | 1354403,184 | 0,211084 | 0,411172 | 0,823087 | 7,44E-05 | 0,0005844 | 0,004594 | 0,00119965 | 0,00208636 |
| 13 | 1,650748138 | 355,9231408 | 1912453 | 0,54367 | 1,05875 | 2,11296 | 0,00125248 | 0,0101759 | 0,079495 | 0,00665979 | 0,00466354 |
| 14 | 1,079116235 | 397,776783 | 4667434,849 | 0,509962 | 0,992901 | 1,98557 | 0,00105028 | 0,00839567 | 0,05883 | 0,00606142 | 0,0045942 |
| 15 | 1,99363225 | 433,9968871 | 7134063,122 | 1,08246 | 2,15312 | 4,30625 | 0,0108246 | 0,0847685 | 0,655075 | 0,029548 | 0,010509 |
| 16 | 1,635266854 | 344,9704064 | 1447633,502 | 0,481922 | 0,938582 | 1,89691 | 0,000884905 | 0,00708849 | 0,056082 | 0,00519918 | 0,00405331 |
| 17 | 0,849346349 | 321,7921032 | 5924681,759 | 0,487493 | 0,985242 | 1,93651 | 0,000973412 | 0,0078462 | 0,057643 | 0,00515349 | 0,00408751 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|
| 18 | 0,690481389 | 446,3361029 | 6565087,207 | 0,364636 | 0,718101 | 1,40858 | 0,000384221 | 0,00308527 | 0,023669 | 0,00323269 | 0,00353118 |
| 19 | 1,681564192 | 317,268999 | 1715883,79 | 0,553819 | 1,10888 | 2,1524 | 0,00134324 | 0,0108554 | 0,084434 | 0,00659897 | 0,00459885 |
| 20 | 0,989822923 | 555,2061033 | 9428362,293 | 0,552565 | 1,1086 | 2,13802 | 0,00142003 | 0,0108302 | 0,082914 | 0,00845878 | 0,00588491 |
| 21 | 1,555466195 | 330,8101652 | 9093298,001 | 1,08429 | 2,17765 | 4,29309 | 0,01072 | 0,0843792 | 0,670102 | 0,025602 | 0,00924789 |
| 22 | 0,411809238 | 549,0956051 | 2469502,228 | 0,124782 | 0,243018 | 0,477699 | 1,54E-05 | 0,000117563 | 0,000928 | 0,000431537 | 0,00128128 |
| 23 | 0,924367785 | 557,1151583 | 3563480,49 | 0,330898 | 0,644361 | 1,25714 | 0,000287132 | 0,00219189 | 0,017061 | 0,0030005 | 0,0034761 |
| 24 | 2,485246091 | 570,5709041 | 9828255,179 | 1,42644 | 2,78348 | 5,46754 | 0,0230629 | 0,179838 | 1,33248 | 0,0548642 | 0,0152245 |
| 25 | 2,175210365 | 406,9226303 | 3226897,876 | 0,846331 | 1,69437 | 3,30632 | 0,00479939 | 0,0387364 | 0,305881 | 0,017425 | 0,00792795 |
| 26 | 0,307284217 | 381,5205696 | 2921214,201 | 0,116283 | 0,232805 | 0,454781 | 1,32E-05 | 0,000108205 | 0,000832 | 0,000326423 | 0,00105166 |
| 27 | 2,019289132 | 514,9094361 | 3042684,78 | 0,683783 | 1,36907 | 2,66546 | 0,0026054 | 0,0204334 | 0,157069 | 0,0128677 | 0,00713216 |
| 28 | 0,325001224 | 472,5635336 | 5250639,378 | 0,149381 | 0,290849 | 0,572002 | 2,64E-05 | 0,000211036 | 0,001523 | 0,000567016 | 0,00147136 |
| 29 | 1,693465686 | 357,2329001 | 4122801,585 | 0,778369 | 1,55817 | 3,04824 | 0,0039612 | 0,0311377 | 0,225655 | 0,0139778 | 0,00677734 |
| 30 | 1,73400441 | 452,8829715 | 3448478,483 | 0,656185 | 1,31372 | 2,56633 | 0,00237414 | 0,0185671 | 0,145069 | 0,0112211 | 0,00652075 |
| 31 | 1,476426334 | 497,6485738 | 4298861,961 | 0,607262 | 1,18243 | 2,30323 | 0,00177422 | 0,0136066 | 0,1058 | 0,00953822 | 0,0060946 |
| 32 | 0,954513538 | 475,2739831 | 911164,8399 | 0,195993 | 0,392596 | 0,78596 | 6,29E-05 | 0,000481508 | 0,00387 | 0,00105722 | 0,00186864 |
| 33 | 1,540750735 | 439,4492139 | 6428429,178 | 0,791373 | 1,60238 | 3,14313 | 0,00422952 | 0,0333967 | 0,26298 | 0,015912 | 0,007644 |
| 34 | 0,646323964 | 547,4628952 | 7667242,243 | 0,33197 | 0,646324 | 1,26679 | 0,000299771 | 0,00232364 | 0,018696 | 0,00299124 | 0,00351138 |
| 35 | 1,751816376 | 467,0445814 | 8731408 | 1,03379 | 2,03211 | 3,99414 | 0,00876005 | 0,0688546 | 0,505794 | 0,0266855 | 0,0101076 |
| 36 | 0,501906065 | 393,4224798 | 8229609,811 | 0,313097 | 0,622364 | 1,20457 | 0,000243167 | 0,00191706 | 0,013421 | 0,00224307 | 0,00281017 |
| 37 | 2,112785649 | 313,9855901 | 3364211,817 | 0,944504 | 1,89077 | 3,7185 | 0,00666984 | 0,0538341 | 0,398009 | 0,0191266 | 0,00770043 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|
| 38 | 2,366175492 | 484,2394173 | 4190916,663 | 0,97322 | 1,895 | 3,69123 | 0,00730593 | 0,0559879 | 0,435501 | 0,0242448 | 0,00976743 |
| 39 | 1,441201429 | 425,5422118 | 3762394,533 | 0,592773 | 1,15422 | 2,30592 | 0,00164929 | 0,0131876 | 0,100792 | 0,00861758 | 0,0055913 |
| 40 | 0,403193472 | 353,9597499 | 1643808,703 | 0,122171 | 0,244632 | 0,483832 | 1,52E-05 | 0,000119909 | 0,000947 | 0,000348515 | 0,00106729 |
| 41 | 0,540539028 | 335,1731206 | 1050147,856 | 0,138634 | 0,277636 | 0,540539 | 2,23E-05 | 0,000175166 | 0,001367 | 0,00043777 | 0,00113317 |
| 42 | 1,345591261 | 489,7012709 | 5081645,109 | 0,601536 | 1,17123 | 2,31442 | 0,00172473 | 0,0137806 | 0,099054 | 0,00929882 | 0,00609183 |
| 43 | 1,454943554 | 306,6038032 | 5955010,403 | 0,858594 | 1,68773 | 3,37547 | 0,00531625 | 0,0420304 | 0,301401 | 0,0155445 | 0,00700196 |
| 44 | 0,555687648 | 565,5931214 | 5791907,746 | 0,248416 | 0,483681 | 0,955783 | 0,000121546 | 0,000931452 | 0,006859 | 0,00167595 | 0,0025939 |
| 45 | 1,761738598 | 469,0998188 | 2637385,762 | 0,580224 | 1,16175 | 2,25503 | 0,001641 | 0,0124847 | 0,0971 | 0,00896593 | 0,00584166 |
| 46 | 2,047724972 | 414,0170209 | 4373407,824 | 0,915419 | 1,78238 | 3,52209 | 0,00607779 | 0,0485676 | 0,361265 | 0,0202186 | 0,00845289 |
| 47 | 1,275767296 | 324,4995202 | 4520566,583 | 0,65527 | 1,27577 | 2,55153 | 0,00219517 | 0,0178673 | 0,143986 | 0,00901045 | 0,00543141 |
| 48 | 0,471042806 | 397,5097849 | 7577804,514 | 0,277973 | 0,54641 | 1,09282 | 0,000175806 | 0,00138113 | 0,010102 | 0,00181455 | 0,00255911 |
| 49 | 1,186412719 | 312,6446342 | 9078874,535 | 0,850308 | 1,70843 | 3,36941 | 0,00516665 | 0,0417738 | 0,315105 | 0,0152607 | 0,00705371 |
| 50 | 0,774369904 | 430,8619066 | 9777938,032 | 0,496664 | 0,991193 | 1,95141 | 0,001003 | 0,00762764 | 0,061234 | 0,00601357 | 0,00474376 |
| 51 | 1,202828822 | 437,5883791 | 7852051,862 | 0,690379 | 1,34717 | 2,69434 | 0,00268227 | 0,0210809 | 0,158402 | 0,011718 | 0,00653479 |
| 52 | 1,531866894 | 351,3428423 | 7091422,409 | 0,929438 | 1,83824 | 3,61521 | 0,0063601 | 0,0516233 | 0,362969 | 0,0191143 | 0,00807487 |
| 53 | 0,804789452 | 445,9715608 | 4941299,66 | 0,369906 | 0,72022 | 1,41643 | 0,000401026 | 0,00320435 | 0,022999 | 0,00337585 | 0,00353338 |
| 54 | 0,372019213 | 386,8884075 | 8712748,868 | 0,238605 | 0,476185 | 0,937488 | 0,000107666 | 0,000845727 | 0,006707 | 0,00130645 | 0,00214648 |
| 55 | 1,791067706 | 561,4278308 | 5028326,232 | 0,736675 | 1,47479 | 2,86571 | 0,00336356 | 0,0255479 | 0,198082 | 0,0153728 | 0,00786357 |
| 56 | 1,096626408 | 443,4754942 | 2195396,538 | 0,34165 | 0,684094 | 1,35982 | 0,000333479 | 0,00254891 | 0,020111 | 0,00302096 | 0,00330444 |
| 57 | 2,4071905 | 337,7331679 | 8868935,943 | 1,63207 | 3,27378 | 6,45127 | 0,0370754 | 0,288385 | 2,32853 | 0,0593425 | 0,0143117 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|
| 58 | 0,730676164 | 401,1518338 | 1225360,547 | 0,1874 | 0,365018 | 0,730676 | 5,13E-05 | 0,000408875 | 0,003225 | 0,000845437 | 0,00169471 |
| 59 | 2,129630563 | 374,2585754 | 7325068,74 | 1,25674 | 2,47037 | 4,94074 | 0,0166863 | 0,133792 | 0,950328 | 0,0369717 | 0,0112258 |
| 60 | 0,889612613 | 483,3498192 | 8307768,502 | 0,496623 | 0,996366 | 1,95715 | 0,00103031 | 0,00812391 | 0,060303 | 0,00645777 | 0,00498093 |
| 61 | 1,416161975 | 503,6854323 | 2532321,194 | 0,4412 | 0,883425 | 1,75604 | 0,000721741 | 0,00548952 | 0,04331 | 0,00541952 | 0,00454897 |
| 62 | 0,440933599 | 326,1193097 | 5666332,186 | 0,246149 | 0,493846 | 0,970054 | 0,000125307 | 0,00100395 | 0,007588 | 0,0013231 | 0,00205824 |
| 63 | 1,931640853 | 568,0892778 | 6874417,006 | 0,912843 | 1,82734 | 3,55422 | 0,00649563 | 0,0486274 | 0,356262 | 0,0237423 | 0,00987858 |
| 64 | 2,069608965 | 405,3833223 | 1080434,153 | 0,5021 | 0,978043 | 1,95785 | 0,000982017 | 0,00765709 | 0,060134 | 0,00609386 | 0,00448826 |
| 65 | 0,612466255 | 522,333092 | 7449692,894 | 0,31458 | 0,612466 | 1,22493 | 0,000261978 | 0,0019782 | 0,016025 | 0,00266679 | 0,00322847 |
| 66 | 2,291201086 | 365,4446429 | 8075751,677 | 1,42929 | 2,84109 | 5,68218 | 0,0249099 | 0,196263 | 1,47758 | 0,0474414 | 0,0128284 |
| 67 | 1,612515753 | 369,8568237 | 2755611,13 | 0,610211 | 1,22168 | 2,38652 | 0,00179808 | 0,014519 | 0,116661 | 0,00864878 | 0,00551873 |
| 68 | 2,336126221 | 476,3530803 | 9693389,794 | 1,41741 | 2,80335 | 5,6067 | 0,0239804 | 0,189143 | 1,29894 | 0,0519357 | 0,014311 |
| 69 | 1,387284403 | 520,5602562 | 6159898,047 | 0,655594 | 1,27645 | 2,5526 | 0,0022341 | 0,0178398 | 0,124998 | 0,0114901 | 0,00688262 |
| 70 | 1,873383269 | 539,2448256 | 7961537,418 | 0,989315 | 1,94832 | 3,8217 | 0,00769674 | 0,0616408 | 0,483313 | 0,0262568 | 0,0101778 |
| 71 | 0,765903475 | 508,0502665 | 7491243,938 | 0,404466 | 0,79654 | 1,56244 | 0,00052469 | 0,00421095 | 0,032846 | 0,00424597 | 0,00416104 |
| 72 | 1,867298696 | 343,6252463 | 8503875,479 | 1,23136 | 2,46483 | 4,92967 | 0,0159227 | 0,124012 | 1,00968 | 0,0340323 | 0,0107739 |
| 73 | 2,25202676 | 535,8201495 | 9613852,56 | 1,29258 | 2,52227 | 5,04454 | 0,0181773 | 0,138434 | 1,03963 | 0,045379 | 0,0133892 |
| 74 | 2,216257638 | 413,0946625 | 9460931,203 | 1,42146 | 2,83681 | 5,58497 | 0,0241501 | 0,189238 | 1,43553 | 0,0487424 | 0,0131766 |
| 75 | 2,440351047 | 303,4372062 | 5546790,61 | 1,40067 | 2,83081 | 5,46639 | 0,0223761 | 0,183365 | 1,34117 | 0,041154 | 0,0113914 |
| 76 | 1,914118945 | 329,9800768 | 6653551,379 | 1,16136 | 2,29694 | 4,51732 | 0,0123995 | 0,100665 | 0,708122 | 0,0288907 | 0,00978898 |
| 77 | 0,665452122 | 517,2337098 | 2103377,103 | 0,190738 | 0,371486 | 0,745306 | 5,49E-05 | 0,000439542 | 0,003454 | 0,00100364 | 0,00194171 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|----------|----------|----------|-------------|-------------|----------|-------------|------------|
| 78 | 1,002164533 | 528,5917509 | 5323425,99 | 0,435739 | 0,872303 | 1,68364 | 0,000695772 | 0,00528657 | 0,039324 | 0,00520245 | 0,00453705 |
| 79 | 2,26810339 | 417,0820332 | 2340038,618 | 0,746994 | 1,49566 | 2,90317 | 0,00348576 | 0,0266395 | 0,207194 | 0,0140541 | 0,00705686 |
| 80 | 0,486198228 | 460,4448262 | 3114200,835 | 0,174045 | 0,348461 | 0,680678 | 4,43E-05 | 0,000346639 | 0,002686 | 0,000797177 | 0,00171726 |
| 81 | 2,141754252 | 420,8391807 | 8958951,929 | 1,33606 | 2,65578 | 5,22588 | 0,0189043 | 0,148966 | 1,0478 | 0,0428648 | 0,0127336 |
| 82 | 0,280609404 | 411,0417558 | 6108656,777 | 0,148187 | 0,291834 | 0,572443 | 2,58E-05 | 0,000207076 | 0,001632 | 0,000517685 | 0,00135044 |
| 83 | 1,808255526 | 339,7708651 | 1550792,844 | 0,547918 | 1,09713 | 2,16991 | 0,00130058 | 0,0105134 | 0,083007 | 0,00679022 | 0,00463225 |
| 84 | 1,327838676 | 479,091783 | 7801257,813 | 0,720962 | 1,43407 | 2,81502 | 0,00315201 | 0,024673 | 0,190493 | 0,0136241 | 0,00721395 |
| 85 | 2,41605593 | 512,2480419 | 9277368,398 | 1,38673 | 2,70598 | 5,41197 | 0,0224726 | 0,17651 | 1,28378 | 0,051562 | 0,0143644 |
| 86 | 1,291910301 | 531,0909779 | 6362145,163 | 0,610523 | 1,22215 | 2,37712 | 0,00191401 | 0,0145475 | 0,102683 | 0,0101761 | 0,00640945 |
| 87 | 2,311110037 | 526,8207818 | 4431614,308 | 0,924533 | 1,8509 | 3,60533 | 0,00644237 | 0,0504996 | 0,390919 | 0,0234601 | 0,00954012 |
| 88 | 1,128378536 | 540,974284 | 1802433,558 | 0,297556 | 0,579567 | 1,12838 | 0,000208536 | 0,00163686 | 0,012439 | 0,00247994 | 0,00308596 |
| 89 | 1,039001169 | 363,0287861 | 6990420,755 | 0,613137 | 1,20524 | 2,41048 | 0,00188578 | 0,0148898 | 0,108412 | 0,00853037 | 0,00547684 |
| 90 | 1,154331172 | 385,5616121 | 9264712,958 | 0,761205 | 1,47754 | 2,95509 | 0,00361041 | 0,0272868 | 0,223333 | 0,0133688 | 0,00686297 |
| 91 | 1,22452825 | 533,2967343 | 3883479,833 | 0,463388 | 0,90233 | 1,76332 | 0,0007883 | 0,00630079 | 0,047695 | 0,00580254 | 0,00475069 |
| 92 | 1,938755126 | 361,1890041 | 6730749,325 | 1,1441 | 2,24896 | 4,42036 | 0,0118587 | 0,0933224 | 0,685593 | 0,0287544 | 0,00991497 |
| 93 | 0,827908935 | 544,9309268 | 5680018,131 | 0,37011 | 0,720628 | 1,424 | 0,000401959 | 0,00320996 | 0,023072 | 0,0037173 | 0,00386461 |
| 94 | 1,117856718 | 373,156178 | 4022073,162 | 0,499729 | 1,00039 | 1,96743 | 0,0010164 | 0,00797713 | 0,058951 | 0,00583615 | 0,00447372 |
| 95 | 2,092816989 | 390,8711166 | 8604448,72 | 1,30553 | 2,59509 | 5,19019 | 0,0189848 | 0,149572 | 1,11132 | 0,0407486 | 0,0120751 |
| 96 | 0,272431569 | 310,6229743 | 3867325,097 | 0,132369 | 0,257721 | 0,512171 | 1,84E-05 | 0,000146815 | 0,001196 | 0,0003629 | 0,00105693 |
| 97 | 1,830882904 | 381,0711305 | 7231811,809 | 1,08044 | 2,12382 | 4,17441 | 0,00999184 | 0,0810632 | 0,590132 | 0,0267717 | 0,00965106 |

| | | | | | | | | | | | |
|-----|-------------|-------------|-------------|----------|---------|---------|------------|------------|----------|------------|------------|
| 98 | 1,496299925 | 422,9342242 | 2819629,14 | 0,535633 | 1,07241 | 2,09482 | 0,00125132 | 0,00982078 | 0,078277 | 0,0071738 | 0,00512099 |
| 99 | 2,467267031 | 564,5660065 | 3630469,75 | 0,883212 | 1,71989 | 3,35548 | 0,00546005 | 0,0416813 | 0,324427 | 0,0216596 | 0,0092782 |
| 100 | 1,589117455 | 428,9762198 | 2300695,113 | 0,509031 | 1,01923 | 2,03407 | 0,00110787 | 0,00867304 | 0,066296 | 0,00671039 | 0,0049443 |

b) Simulação de 191 casos de vazamento de gás genérico

| Simulacao | D (mm) | T (K) | k (W m ⁻¹ K ⁻¹) | CP (J kg ⁻¹ K ⁻¹) | LIE | m (Pa s) | PM (kg kmol ⁻¹) | P (Pa) | Extensao (m) | ExtensaoMeio (m) | ExtensaoQuarto (m) | Volume (m ³) | VolumeMeio (m ³) | VolumeQuarto (m ³) | MFlow (kg s ⁻¹) | Barrel (m) |
|-----------|----------|----------|--|--|----------|----------|-----------------------------|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------|
| 1 | 1,066483 | 594,395 | 0,042264012 | 2468,724897 | 0,073988 | 5,77E-06 | 73,85851608 | 104249,8157 | 0,0399039 | 0,0698734 | 0,129063 | 4,40E-07 | 2,55E-06 | 1,65E-05 | 0,000477 | 0 |
| 2 | 1,355692 | 506,318 | 0,125617297 | 4830,007681 | 0,059372 | 2,07E-05 | 14,4649036 | 7673796,597 | 0,557603 | 1,08574 | 2,11488 | 0,0013804 | 0,010209 | 0,078918 | 0,012527 | 0,00736527 |
| 3 | 0,60465 | 437,2593 | 0,166841419 | 5171,052433 | 0,002591 | 1,93E-05 | 75,6863314 | 9449999,061 | 1,81395 | 1,81395 | 1,81395 | 0,111458 | 0,206888 | 0,286995 | 0,006792 | 0,00370407 |
| 4 | 2,120889 | 284,1432 | 0,139766268 | 9289,988968 | 0,014938 | 9,75E-06 | 93,97225582 | 10894236,95 | 2,00636 | 3,90244 | 6,36267 | 0,0669831 | 0,453996 | 3,36479 | 0,130762 | 0,0142072 |
| 5 | 2,231056 | 635,8173 | 0,081582792 | 1392,818441 | 0,035022 | 1,48E-05 | 47,10028814 | 7274506,332 | 0,776774 | 1,47123 | 2,85575 | 0,0036574 | 0,026784 | 0,195989 | 0,049969 | 0,012121 |
| 6 | 1,577252 | 364,4023 | 0,161016988 | 10351,73514 | 0,068644 | 9,51E-06 | 57,10009333 | 4800456,03 | 0,281819 | 0,534098 | 1,01161 | 0,000169157 | 0,001174 | 0,008657 | 0,023002 | 0,00714062 |
| 7 | 2,281175 | 670,9955 | 0,061153519 | 12520,76277 | 0,095418 | 1,18E-05 | 6,221276522 | 6314520,526 | 0,730713 | 1,38407 | 2,73741 | 0,00328903 | 0,02292 | 0,171494 | 0,018261 | 0,0113174 |
| 8 | 0,309622 | 482,796 | 0,084284381 | 10001,58109 | 0,039876 | 1,23E-05 | 75,13905567 | 11279351,89 | 0,117168 | 0,215832 | 0,396317 | 1,19E-05 | 7,79E-05 | 0,000523 | 0,002 | 0,00207406 |
| 9 | 2,324383 | 598,779 | 0,03004699 | 12564,46935 | 0,082795 | 7,16E-06 | 51,95235702 | 1402986,346 | 0,19579 | 0,351463 | 0,647977 | 5,63E-05 | 0,000345 | 0,002212 | 0,012421 | 0,00595442 |
| 10 | 1,929541 | 294,3019 | 0,051438888 | 3384,684269 | 0,027724 | 1,99E-05 | 85,71066159 | 4946087,95 | 0,73018 | 1,42184 | 2,70136 | 0,00292538 | 0,022207 | 0,169494 | 0,047731 | 0,00873552 |
| 11 | 1,44809 | 668,5167 | 0,097323661 | 4414,594396 | 0,091277 | 2,00E-05 | 13,62861828 | 3597896,96 | 0,251642 | 0,49036 | 0,954919 | 0,000131778 | 0,000941 | 0,006942 | 0,00623 | 0,00544556 |
| 12 | 1,864193 | 411,0652 | 0,036920615 | 12751,15948 | 0,050727 | 9,92E-06 | 97,3549536 | 11396654,4 | 0,549388 | 0,984462 | 1,86419 | 0,00115754 | 0,007304 | 0,051215 | 0,089629 | 0,0124876 |
| 13 | 1,196678 | 528,931 | 0,082769012 | 1557,566501 | 0,023025 | 4,95E-06 | 63,35324681 | 5888720,715 | 0,520313 | 1,0131 | 1,96255 | 0,00110736 | 0,008269 | 0,062236 | 0,014499 | 0,00593698 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 14 | 0,474569 | 499,404 | 0,143896986 | 8679,094105 | 0,006267 | 9,83E-06 | 58,72675929 | 2238463,639 | 0,493551 | 0,949137 | 1,42371 | 0,00100204 | 0,007674 | 0,044646 | 0,000897 | 0,0015244 |
| 15 | 0,871255 | 422,7242 | 0,159817375 | 10399,56312 | 0,074625 | 6,31E-06 | 37,47831172 | 6650998,636 | 0,194459 | 0,358351 | 0,697764 | 5,50E-05 | 0,000386 | 0,002782 | 0,007342 | 0,00459261 |
| 16 | 0,914564 | 440,2294 | 0,074466072 | 8843,698846 | 0,009137 | 1,63E-05 | 16,35617332 | 4015966,539 | 1,6828 | 2,74369 | 2,74369 | 0,0364556 | 0,26035 | 0,619245 | 0,003451 | 0,00377527 |
| 17 | 2,492681 | 671,9621 | 0,169285044 | 14285,10141 | 0,096723 | 2,23E-05 | 99,83965264 | 11850920,43 | 0,433167 | 0,734607 | 1,28031 | 0,000500038 | 0,002811 | 0,016131 | 0,132646 | 0,0172006 |
| 18 | 2,245548 | 457,2249 | 0,04695929 | 4246,242644 | 0,064202 | 1,17E-05 | 61,61771244 | 5761835,085 | 0,42418 | 0,78182 | 1,48079 | 0,000550996 | 0,003694 | 0,025706 | 0,051978 | 0,0111407 |
| 19 | 1,601322 | 510,6013 | 0,048178313 | 4616,587822 | 0,004555 | 2,14E-05 | 19,20384522 | 1973760,59 | 3,65101 | 4,80397 | 4,80397 | 0,386595 | 2,08706 | 3,90541 | 0,005721 | 0,00467247 |
| 20 | 0,229577 | 513,0083 | 0,121620525 | 4784,53195 | 0,093812 | 1,36E-05 | 11,28132151 | 3705031,271 | 0,0471398 | 0,0944264 | 0,183862 | 8,87E-07 | 6,71E-06 | 5,34E-05 | 0,000167 | 0,000890671 |
| 21 | 0,27283 | 347,3035 | 0,122560106 | 12864,93246 | 0,003684 | 1,73E-05 | 39,50689373 | 4454405,766 | 0,818489 | 0,818489 | 0,818489 | 0,00628705 | 0,015726 | 0,023619 | 0,000552 | 0,00119784 |
| 22 | 2,090765 | 356,4942 | 0,079075521 | 4047,766619 | 0,086134 | 1,60E-05 | 55,28929879 | 2644238,289 | 0,232735 | 0,441408 | 0,836387 | 9,26E-05 | 0,000651 | 0,00487 | 0,023196 | 0,00715551 |
| 23 | 0,512551 | 395,6363 | 0,141760273 | 1700,58543 | 0,022514 | 8,17E-06 | 34,67620071 | 1037796,025 | 0,159683 | 0,310983 | 0,615061 | 3,22E-05 | 0,000254 | 0,002 | 0,000487 | 0,0010745 |
| 24 | 0,322632 | 280,8182 | 0,054378368 | 9838,953946 | 0,055387 | 1,12E-05 | 84,38534349 | 8897575,818 | 0,0874763 | 0,161175 | 0,3138 | 4,59E-06 | 3,30E-05 | 0,000258 | 0,00237 | 0,00191818 |
| 25 | 0,351762 | 517,7828 | 0,049267863 | 7368,981929 | 0,065832 | 1,76E-05 | 14,14555471 | 11831948,56 | 0,161681 | 0,314798 | 0,60503 | 3,39E-05 | 0,00025 | 0,001788 | 0,001224 | 0,00235634 |
| 26 | 1,792934 | 576,2043 | 0,112094331 | 12669,44997 | 0,017002 | 5,28E-06 | 23,07551006 | 6590502,463 | 1,74386 | 3,37072 | 5,3788 | 0,0443725 | 0,331668 | 2,07803 | 0,021466 | 0,00916923 |
| 27 | 1,059479 | 479,6196 | 0,074262878 | 5580,624265 | 0,042751 | 2,23E-05 | 6,94700204 | 8508089,983 | 0,922191 | 1,8223 | 3,17844 | 0,00673264 | 0,049791 | 0,372966 | 0,006438 | 0,00593201 |
| 28 | 2,456567 | 276,2397 | 0,145999903 | 1860,32737 | 0,074682 | 1,49E-05 | 21,39978966 | 2874682,916 | 0,548292 | 1,09819 | 2,19843 | 0,00137935 | 0,01053 | 0,085473 | 0,02672 | 0,00840744 |
| 29 | 1,670405 | 435,4592 | 0,145064948 | 3298,113005 | 0,021379 | 1,55E-05 | 54,73907699 | 9221782,883 | 1,13253 | 2,20493 | 4,27624 | 0,0114639 | 0,082687 | 0,665102 | 0,043868 | 0,0102328 |
| 30 | 0,355698 | 631,3087 | 0,006955918 | 12821,32127 | 0,066458 | 1,98E-05 | 22,32132442 | 6393228,429 | 0,0964417 | 0,177693 | 0,345961 | 7,41E-06 | 4,83E-05 | 0,000332 | 0,000774 | 0,00181907 |
| 31 | 1,74436 | 492,7801 | 0,027255526 | 534,9949029 | 0,076477 | 1,74E-05 | 35,40479026 | 9746147,179 | 0,472955 | 0,895953 | 1,74436 | 0,000754505 | 0,005532 | 0,04463 | 0,04481 | 0,0106859 |
| 32 | 1,564495 | 397,9305 | 0,058871963 | 8193,713105 | 0,029275 | 1,92E-05 | 76,82689337 | 9119890,394 | 0,71909 | 1,36177 | 2,56577 | 0,00281817 | 0,019987 | 0,140484 | 0,046196 | 0,00958405 |
| 33 | 0,370475 | 553,9106 | 0,104803433 | 11055,43805 | 0,064641 | 1,05E-05 | 7,513707212 | 11085615,47 | 0,218626 | 0,429751 | 0,844684 | 9,01E-05 | 0,000656 | 0,004788 | 0,000939 | 0,002409 |
| 34 | 1,971044 | 536,5751 | 0,064862735 | 719,1666554 | 0,013311 | 1,74E-05 | 27,25144579 | 6101925,699 | 2,44409 | 4,80935 | 5,91313 | 0,119057 | 0,816615 | 4,0407 | 0,030999 | 0,00948572 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 35 | 0,775131 | 447,3014 | 0,12366199 | 7534,333942 | 0,062003 | 1,64E-05 | 41,19202117 | 8767716,679 | 0,216086 | 0,409339 | 0,775131 | 7,89E-05 | 0,000545 | 0,004009 | 0,007713 | 0,00460847 |
| 36 | 1,900125 | 592,2605 | 0,147041479 | 4140,955964 | 0,088507 | 1,83E-05 | 11,92643782 | 10290161,86 | 0,625801 | 1,2187 | 2,35615 | 0,00202607 | 0,015154 | 0,112625 | 0,028155 | 0,0119928 |
| 37 | 1,460012 | 502,6139 | 0,129345347 | 6123,945168 | 0,048373 | 1,03E-05 | 18,82823729 | 8111345,564 | 0,652687 | 1,27082 | 2,51122 | 0,002348 | 0,01763 | 0,124508 | 0,017032 | 0,00817459 |
| 38 | 0,696496 | 569,987 | 0,157158299 | 289,008621 | 0,035948 | 1,72E-05 | 71,78831557 | 494439,8468 | 0,069353 | 0,135277 | 0,263569 | 2,56E-06 | 1,90E-05 | 0,000143 | 0,000623 | 0,000726933 |
| 39 | 1,976356 | 338,1929 | 0,135366088 | 2805,734445 | 0,008963 | 1,07E-05 | 77,44977567 | 10158361,42 | 3,08312 | 5,92907 | 5,92907 | 0,237728 | 1,6949 | 5,40565 | 0,089634 | 0,012474 |
| 40 | 2,064497 | 655,309 | 0,146538532 | 10179,16972 | 0,037524 | 2,05E-05 | 81,00838624 | 1661915,98 | 0,312166 | 0,544412 | 1,0031 | 0,000218976 | 0,001338 | 0,008594 | 0,013262 | 0,00564612 |
| 41 | 2,423591 | 463,7244 | 0,04514185 | 3607,030299 | 0,048795 | 8,28E-06 | 73,28593554 | 1859561,561 | 0,318851 | 0,587978 | 1,11396 | 0,000233799 | 0,001561 | 0,011543 | 0,022775 | 0,00707176 |
| 42 | 1,641187 | 427,3077 | 0,086574991 | 2059,507138 | 0,010536 | 5,11E-06 | 28,35896045 | 2378582,184 | 1,64119 | 3,21673 | 4,92356 | 0,0355265 | 0,288683 | 1,79723 | 0,009167 | 0,00527179 |
| 43 | 0,931246 | 476,1491 | 0,033770852 | 5966,480291 | 0,002279 | 1,57E-05 | 32,11599717 | 4990360,296 | 2,79374 | 2,79374 | 2,79374 | 0,507587 | 0,856103 | 1,12326 | 0,005682 | 0,00421599 |
| 44 | 1,190281 | 638,4756 | 0,113667729 | 4740,459192 | 0,069743 | 5,41E-06 | 42,40467766 | 10411146,64 | 0,288769 | 0,532106 | 1,00768 | 0,000187107 | 0,001201 | 0,00816 | 0,018484 | 0,00773975 |
| 45 | 1,286648 | 417,6102 | 0,018994028 | 8325,810418 | 0,077255 | 9,37E-06 | 47,94889308 | 11558429,16 | 0,329992 | 0,608036 | 1,15144 | 0,00026571 | 0,001749 | 0,01303 | 0,030735 | 0,00861885 |
| 46 | 0,824286 | 514,0691 | 0,071212777 | 9756,499281 | 0,005539 | 1,51E-05 | 45,62488924 | 7146253,683 | 1,8464 | 2,47286 | 2,47286 | 0,0500797 | 0,277903 | 0,516823 | 0,007028 | 0,00447822 |
| 47 | 1,712695 | 486,1951 | 0,100478415 | 2535,233015 | 0,031212 | 1,17E-05 | 26,95862034 | 1311549,947 | 0,439262 | 0,855598 | 1,66581 | 0,000660622 | 0,004986 | 0,039707 | 0,005445 | 0,00410691 |
| 48 | 0,588949 | 551,223 | 0,093355716 | 11345,71669 | 0,009965 | 1,84E-05 | 80,60495452 | 4383762,12 | 0,45876 | 0,871644 | 1,69617 | 0,000789343 | 0,005488 | 0,039305 | 0,002837 | 0,00258574 |
| 49 | 1,037491 | 321,5465 | 0,063946482 | 456,5704312 | 0,0298 | 1,82E-05 | 49,62149459 | 116963,324 | 0,136494 | 0,273589 | 0,532885 | 2,01E-05 | 0,000159 | 0,001204 | 0,000573 | 0 |
| 50 | 0,402704 | 319,479 | 0,091295238 | 12988,2668 | 0,008231 | 9,12E-06 | 90,10087156 | 2663424,67 | 0,340926 | 0,660435 | 1,20811 | 0,000323735 | 0,002411 | 0,018922 | 0,001131 | 0,00137823 |
| 51 | 0,202295 | 371,5975 | 0,134393624 | 5360,839269 | 0,0709 | 5,64E-06 | 88,98887406 | 9095861,387 | 0,0415379 | 0,0744557 | 0,141016 | 4,70E-07 | 3,07E-06 | 2,16E-05 | 0,000855 | 0,00123925 |
| 52 | 0,664857 | 529,8787 | 0,150771815 | 6398,271765 | 0,067259 | 6,63E-06 | 8,356630331 | 1765124,701 | 0,152575 | 0,305589 | 0,594992 | 3,04E-05 | 0,000227 | 0,001809 | 0,000644 | 0,00181829 |
| 53 | 2,018579 | 353,6187 | 0,162666062 | 9327,684018 | 0,024886 | 4,81E-06 | 36,1570913 | 4052042,095 | 1,06599 | 2,01858 | 4,03716 | 0,00946423 | 0,070791 | 0,574029 | 0,02646 | 0,00833258 |
| 54 | 0,962308 | 630,0504 | 0,104941268 | 11528,17264 | 0,063659 | 1,65E-05 | 35,2538904 | 8229168,017 | 0,253763 | 0,467567 | 0,885424 | 0,000137856 | 0,000875 | 0,005806 | 0,008841 | 0,00555232 |
| 55 | 0,62013 | 362,3946 | 0,142852157 | 511,5100212 | 0,01171 | 1,90E-05 | 88,17476568 | 3294364,241 | 0,408935 | 0,818572 | 1,58753 | 0,000568174 | 0,004226 | 0,034603 | 0,00324 | 0,00226018 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------|
| 56 | 1,988597 | 308,2521 | 0,085779886 | 9555,586306 | 0,024013 | 1,45E-05 | 43,79963984 | 10487746,38 | 1,63744 | 3,18175 | 5,96579 | 0,0347976 | 0,26298 | 2,08378 | 0,074022 | 0,0129308 |
| 57 | 1,88739 | 359,0692 | 0,02514278 | 14045,9725 | 0,05202 | 1,90E-05 | 70,97144708 | 2319069,223 | 0,293439 | 0,540981 | 1,05363 | 0,00018122 | 0,001218 | 0,009074 | 0,018547 | 0,00606264 |
| 58 | 0,91618 | 424,0489 | 0,117177597 | 2094,808122 | 0,012211 | 7,80E-06 | 78,17410612 | 10757276,44 | 0,952827 | 1,90565 | 2,74854 | 0,00756907 | 0,058064 | 0,322744 | 0,018408 | 0,00595742 |
| 59 | 1,407855 | 621,724 | 0,021948405 | 12338,74146 | 0,040191 | 9,21E-06 | 12,80614426 | 5037078,943 | 0,68405 | 1,29537 | 2,53414 | 0,00256914 | 0,018766 | 0,124149 | 0,007776 | 0,00637371 |
| 60 | 0,701443 | 661,9806 | 0,02617427 | 8808,092703 | 0,007131 | 2,12E-05 | 20,98560907 | 5159727,106 | 1,34677 | 2,10433 | 2,10433 | 0,0218133 | 0,135338 | 0,29058 | 0,002369 | 0,00317561 |
| 61 | 1,946588 | 583,9903 | 0,09748962 | 13726,21958 | 0,085391 | 1,29E-05 | 81,64360197 | 2895381,203 | 0,199308 | 0,347811 | 0,623538 | 5,30E-05 | 0,000312 | 0,002005 | 0,020595 | 0,00709469 |
| 62 | 0,752119 | 582,7396 | 0,107638405 | 10643,96505 | 0,080342 | 5,54E-06 | 45,53236934 | 3019659,587 | 0,0962327 | 0,172601 | 0,318062 | 6,54E-06 | 3,99E-05 | 0,00027 | 0,002462 | 0,00274123 |
| 63 | 0,85608 | 462,962 | 0,029001016 | 2759,975216 | 0,082696 | 1,06E-05 | 85,20042161 | 10997977,92 | 0,157276 | 0,281948 | 0,519414 | 2,87E-05 | 0,000165 | 0,001084 | 0,016324 | 0,00573461 |
| 64 | 2,166934 | 274,0954 | 0,009329726 | 5760,040943 | 0,044043 | 1,79E-05 | 17,85293725 | 3539732,182 | 0,942178 | 1,88614 | 3,72713 | 0,00685311 | 0,053743 | 0,418486 | 0,022347 | 0,00840686 |
| 65 | 1,656269 | 533,661 | 0,054965629 | 13904,03034 | 0,06152 | 9,06E-06 | 60,09110717 | 1547062,448 | 0,184369 | 0,33076 | 0,626768 | 4,52E-05 | 0,000295 | 0,001946 | 0,007689 | 0,0043843 |
| 66 | 1,700778 | 639,7607 | 0,091650004 | 1753,827962 | 0,012566 | 8,95E-06 | 83,28655298 | 11667722,96 | 1,48039 | 2,85731 | 5,10233 | 0,0257057 | 0,185916 | 1,42359 | 0,058239 | 0,011393 |
| 67 | 0,255667 | 430,1904 | 0,005979887 | 4286,357759 | 0,007403 | 1,31E-05 | 11,70760145 | 4204630,625 | 0,726095 | 0,767002 | 0,767002 | 0,00320957 | 0,011102 | 0,017806 | 0,000254 | 0,00105538 |
| 68 | 0,161012 | 376,5487 | 0,043291523 | 5707,99804 | 0,061196 | 1,41E-05 | 58,97323152 | 5471139,794 | 0,033061 | 0,0626464 | 0,118646 | 2,71E-07 | 1,90E-06 | 1,42E-05 | 0,000272 | 0,000774874 |
| 69 | 1,437115 | 624,7594 | 0,076782451 | 12371,53148 | 0,062831 | 1,69E-05 | 61,16662755 | 3138299,314 | 0,211338 | 0,368583 | 0,679143 | 6,78E-05 | 0,000416 | 0,00267 | 0,010288 | 0,00540429 |
| 70 | 1,073783 | 366,3095 | 0,038978085 | 8500,821336 | 0,080843 | 1,97E-05 | 95,57629753 | 10578686,84 | 0,208556 | 0,373853 | 0,688701 | 6,45E-05 | 0,000376 | 0,002588 | 0,029052 | 0,00698223 |
| 71 | 0,530435 | 392,226 | 0,13272705 | 1013,727928 | 0,084171 | 1,13E-05 | 57,6201682 | 971324,3562 | 0,0377907 | 0,0697847 | 0,136043 | 3,78E-07 | 2,62E-06 | 1,94E-05 | 0,000616 | 0,0010747 |
| 72 | 1,322535 | 317,1237 | 0,007754259 | 6669,692463 | 0,014405 | 1,45E-05 | 96,38424283 | 4869373,495 | 0,848245 | 1,63994 | 3,22698 | 0,00471514 | 0,035916 | 0,246356 | 0,022423 | 0,00598745 |
| 73 | 1,631821 | 601,1142 | 0,046108132 | 9678,180302 | 0,038394 | 2,13E-05 | 30,628084 | 7886356,649 | 0,709512 | 1,30688 | 2,54564 | 0,00284253 | 0,019176 | 0,137634 | 0,023478 | 0,00913654 |
| 74 | 1,731253 | 334,9594 | 0,03497158 | 8374,745498 | 0,051548 | 1,43E-05 | 62,31160209 | 8756120,724 | 0,524585 | 0,993675 | 1,939 | 0,00111044 | 0,008168 | 0,059492 | 0,053515 | 0,010293 |
| 75 | 0,111952 | 411,2166 | 0,038241577 | 10937,26933 | 0,039312 | 2,19E-05 | 2,818990299 | 3883218,603 | 0,125386 | 0,246295 | 0,335856 | 1,64E-05 | 0,000124 | 0,000704 | 2,69E-05 | 0,00043433 |
| 76 | 0,725902 | 373,5572 | 0,106539385 | 6494,029407 | 0,046627 | 1,65E-05 | 86,23147824 | 2274024,137 | 0,109761 | 0,208065 | 0,394135 | 9,65E-06 | 6,80E-05 | 0,000482 | 0,002899 | 0,00233173 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 77 | 0,553339 | 614,3126 | 0,067626362 | 6191,903969 | 0,05437 | 1,52E-05 | 82,73710697 | 3404339,114 | 0,0813722 | 0,145917 | 0,261493 | 3,86E-06 | 2,35E-05 | 0,000152 | 0,001907 | 0,00214674 |
| 78 | 0,154589 | 297,9393 | 0,075605706 | 10779,21674 | 0,025849 | 1,97E-05 | 96,82587525 | 9633186,581 | 0,0794011 | 0,154589 | 0,302994 | 3,94E-06 | 2,92E-05 | 0,000235 | 0,00061 | 0,000975701 |
| 79 | 1,51836 | 546,9403 | 0,114974389 | 5513,762744 | 0,049724 | 1,95E-05 | 54,15334054 | 7043032,806 | 0,38942 | 0,737742 | 1,39705 | 0,0004724 | 0,003126 | 0,021714 | 0,024852 | 0,00824902 |
| 80 | 1,305236 | 452,4195 | 0,037999756 | 9191,568647 | 0,01547 | 1,76E-05 | 72,19025924 | 10313781,38 | 1,1361 | 2,14059 | 3,91571 | 0,0115652 | 0,080688 | 0,609262 | 0,033036 | 0,00848724 |
| 81 | 1,479789 | 588,1607 | 0,110724718 | 6642,028596 | 0,087259 | 1,36E-05 | 69,11968443 | 6761064,546 | 0,217613 | 0,390224 | 0,69931 | 7,46E-05 | 0,00044 | 0,002778 | 0,024512 | 0,00780035 |
| 82 | 2,309333 | 407,5254 | 0,153935705 | 1893,33765 | 0,032051 | 1,22E-05 | 6,826490023 | 1103206,515 | 1,36279 | 2,67883 | 5,35765 | 0,0201297 | 0,16355 | 1,18628 | 0,006412 | 0,00328067 |
| 83 | 2,292843 | 642,2909 | 0,11572794 | 7274,078162 | 0,018968 | 9,65E-06 | 83,99395472 | 6963821,82 | 1,14542 | 2,10966 | 3,94369 | 0,0116534 | 0,077981 | 0,50659 | 0,063563 | 0,0124567 |
| 84 | 1,346638 | 441,5409 | 0,106277206 | 2677,350484 | 0,057617 | 1,32E-05 | 22,89854123 | 11170805,39 | 0,585515 | 1,14005 | 2,20849 | 0,00156758 | 0,011808 | 0,088749 | 0,023278 | 0,00875646 |
| 85 | 1,830026 | 288,7765 | 0,118946805 | 13897,46132 | 0,059758 | 8,54E-06 | 87,36196492 | 2554006,861 | 0,254546 | 0,469354 | 0,889174 | 0,000108194 | 0,000776 | 0,005825 | 0,023249 | 0,00626314 |
| 86 | 1,821955 | 664,3508 | 0,127824448 | 1138,864618 | 0,075545 | 2,04E-05 | 44,87602269 | 7993413,042 | 0,325542 | 0,61696 | 1,20146 | 0,00027399 | 0,001824 | 0,013736 | 0,035338 | 0,0102011 |
| 87 | 0,658275 | 399,3256 | 0,072498604 | 4585,692707 | 0,01086 | 6,20E-06 | 20,44033345 | 9685380,996 | 1,4482 | 1,97482 | 1,97482 | 0,0252497 | 0,142348 | 0,265892 | 0,004748 | 0,00403257 |
| 88 | 2,400296 | 385,2383 | 0,069049882 | 6770,36727 | 0,035641 | 7,51E-06 | 67,45576916 | 2442274,04 | 0,521044 | 0,987254 | 1,92233 | 0,00107339 | 0,007797 | 0,05811 | 0,029901 | 0,00795902 |
| 89 | 0,571936 | 543,9721 | 0,019537846 | 7878,968414 | 0,050072 | 1,66E-05 | 60,6152555 | 6856873,334 | 0,142666 | 0,262879 | 0,497824 | 2,22E-05 | 0,000144 | 0,000982 | 0,003616 | 0,00301482 |
| 90 | 1,034415 | 351,5378 | 0,089233935 | 1216,404885 | 0,017645 | 1,07E-05 | 69,65472433 | 931076,0778 | 0,296494 | 0,577458 | 1,11717 | 0,000200975 | 0,001523 | 0,012252 | 0,002544 | 0,0020958 |
| 91 | 0,768528 | 609,1641 | 0,134661036 | 10588,63514 | 0,038059 | 6,69E-06 | 26,42065925 | 5097606,596 | 0,290828 | 0,550808 | 1,0452 | 0,000196452 | 0,001339 | 0,009442 | 0,003219 | 0,00347932 |
| 92 | 0,464291 | 314,4401 | 0,061947685 | 3101,897234 | 0,071831 | 7,71E-06 | 10,21545521 | 3483426,922 | 0,16165 | 0,323649 | 0,650007 | 3,44E-05 | 0,000279 | 0,002247 | 0,000789 | 0,00174597 |
| 93 | 0,810447 | 296,7723 | 0,079741694 | 1964,63674 | 0,084628 | 7,24E-06 | 40,02639022 | 810245,9268 | 0,0682666 | 0,129559 | 0,259605 | 2,25E-06 | 1,71E-05 | 0,000136 | 0,001177 | 0,0015866 |
| 94 | 2,000391 | 557,4199 | 0,09614936 | 3642,387761 | 0,092 | 8,80E-06 | 36,43824154 | 2111152,087 | 0,193712 | 0,357424 | 0,677383 | 5,60E-05 | 0,000356 | 0,002611 | 0,011862 | 0,00602773 |
| 95 | 0,599074 | 516,1697 | 0,133577596 | 10481,28545 | 0,060752 | 7,34E-06 | 79,16684348 | 1289234,708 | 0,0564174 | 0,101248 | 0,186639 | 1,26E-06 | 7,79E-06 | 5,11E-05 | 0,000982 | 0,00148492 |
| 96 | 1,77223 | 472,9677 | 0,053028248 | 13763,11199 | 0,052491 | 7,09E-06 | 20,00419502 | 1892911,666 | 0,384706 | 0,728927 | 1,41933 | 0,000451874 | 0,003321 | 0,024546 | 0,006955 | 0,00517116 |
| 97 | 1,240892 | 496,0562 | 0,015753029 | 924,2579106 | 0,020061 | 1,38E-05 | 33,69579335 | 9241621,955 | 1,1105 | 2,18397 | 3,72268 | 0,0111934 | 0,080489 | 0,607309 | 0,019579 | 0,00737761 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 98 | 0,439674 | 336,1719 | 0,139284168 | 5440,309275 | 0,0903 | 1,00E-05 | 74,99099989 | 3119669,87 | 0,0475978 | 0,0853958 | 0,161824 | 7,21E-07 | 4,61E-06 | 3,36E-05 | 0,001407 | 0,00160247 |
| 99 | 0,844933 | 404,6513 | 0,09307998 | 13178,40174 | 0,04152 | 1,70E-05 | 43,02199979 | 3910139,557 | 0,242183 | 0,458764 | 0,87873 | 0,000109827 | 0,000765 | 0,005682 | 0,004542 | 0,00348783 |
| 100 | 0,339267 | 580,4683 | 0,130325043 | 2275,740424 | 0,030138 | 1,15E-05 | 31,7706645 | 8956720,718 | 0,184208 | 0,366409 | 0,705676 | 5,27E-05 | 0,000398 | 0,003016 | 0,001218 | 0,00201708 |
| 101 | 0,376808 | 561,8249 | 0,07026524 | 12479,64144 | 0,004955 | 1,14E-05 | 92,97517762 | 4714626,166 | 0,542604 | 1,03999 | 1,13043 | 0,00133827 | 0,009597 | 0,033096 | 0,001317 | 0,00170591 |
| 102 | 1,504935 | 457,1013 | 0,120989992 | 7160,914597 | 0,008155 | 1,80E-05 | 94,67988349 | 7938882,738 | 1,80592 | 3,49145 | 4,5148 | 0,0502167 | 0,333133 | 1,73957 | 0,038642 | 0,00868317 |
| 103 | 1,170057 | 497,8582 | 0,166037516 | 7128,000886 | 0,092731 | 1,37E-05 | 97,75415517 | 5579209,901 | 0,145596 | 0,247025 | 0,442775 | 1,88E-05 | 0,000108 | 0,000666 | 0,016217 | 0,00563094 |
| 104 | 2,386939 | 647,9543 | 0,005231171 | 8415,671617 | 0,013456 | 2,10E-05 | 28,71679729 | 6897890,903 | 2,48242 | 4,86936 | 7,16082 | 0,13391 | 1,00516 | 5,70828 | 0,041663 | 0,0125822 |
| 105 | 0,557299 | 474,1906 | 0,155286839 | 3434,930001 | 0,03658 | 5,48E-06 | 88,35062447 | 185251,0487 | 0,0397046 | 0,073319 | 0,142933 | 4,57E-07 | 3,19E-06 | 2,26E-05 | 0,000211 | 0,000376865 |
| 106 | 0,421949 | 385,033 | 0,068248994 | 2353,314991 | 0,036827 | 1,88E-05 | 51,29950732 | 6466789,279 | 0,1553 | 0,302413 | 0,590728 | 2,89E-05 | 0,000219 | 0,001745 | 0,00206 | 0,00215788 |
| 107 | 2,356558 | 324,4766 | 0,072657866 | 8597,313973 | 0,058702 | 1,40E-05 | 64,37489061 | 4621084,211 | 0,47061 | 0,891773 | 1,7365 | 0,000745211 | 0,005452 | 0,041414 | 0,055391 | 0,0103463 |
| 108 | 1,003803 | 646,3583 | 0,066471797 | 14218,15205 | 0,019785 | 6,86E-06 | 66,57327016 | 8579673,674 | 0,609043 | 1,12426 | 2,12806 | 0,0018425 | 0,011843 | 0,079813 | 0,013243 | 0,00596802 |
| 109 | 2,3035 | 344,4506 | 0,069822533 | 10148,80381 | 0,056804 | 6,96E-06 | 15,0969768 | 5652852,726 | 0,947441 | 1,89674 | 3,6856 | 0,00717889 | 0,056217 | 0,426599 | 0,03232 | 0,0110857 |
| 110 | 1,298671 | 350,3036 | 0,103976874 | 6552,612046 | 0,090683 | 1,14E-05 | 73,0329294 | 11217303,02 | 0,259347 | 0,464888 | 0,880495 | 0,000112762 | 0,00075 | 0,005287 | 0,040441 | 0,00869939 |
| 111 | 0,742602 | 643,7008 | 0,083553676 | 11377,24214 | 0,022124 | 1,35E-05 | 79,67266825 | 5694373,134 | 0,314038 | 0,562612 | 1,06935 | 0,000239069 | 0,001518 | 0,010249 | 0,005343 | 0,00368421 |
| 112 | 1,367845 | 434,5219 | 0,136583376 | 11625,83068 | 0,072773 | 1,11E-05 | 98,18847936 | 5921669,884 | 0,218664 | 0,38132 | 0,702564 | 6,62E-05 | 0,000412 | 0,002665 | 0,025046 | 0,00678618 |
| 113 | 1,161361 | 568,0329 | 0,131329194 | 4055,321744 | 0,079893 | 1,25E-05 | 65,24685666 | 1161990,753 | 0,0827409 | 0,144514 | 0,266516 | 3,90E-06 | 2,28E-05 | 0,000157 | 0,002991 | 0,00269363 |
| 114 | 1,429427 | 300,7587 | 0,128677611 | 3489,392809 | 0,077605 | 9,43E-06 | 21,68546376 | 10863897,47 | 0,540926 | 1,08296 | 2,11555 | 0,00123299 | 0,010071 | 0,080816 | 0,029548 | 0,00929479 |
| 115 | 0,454815 | 503,2025 | 0,088008757 | 13974,36689 | 0,076814 | 1,19E-05 | 75,99233907 | 7301982,884 | 0,081265 | 0,145688 | 0,261047 | 3,68E-06 | 2,25E-05 | 0,000148 | 0,002792 | 0,00247094 |
| 116 | 0,532803 | 539,8794 | 0,165180592 | 1491,801914 | 0,025326 | 1,24E-05 | 94,5068104 | 7557390,235 | 0,201624 | 0,381862 | 0,724611 | 6,21E-05 | 0,000439 | 0,003243 | 0,004327 | 0,00298315 |
| 117 | 1,084543 | 507,4166 | 0,052485078 | 627,3823385 | 0,053244 | 2,01E-05 | 29,82126568 | 9307720,079 | 0,421974 | 0,821674 | 1,60512 | 0,000591489 | 0,004629 | 0,035771 | 0,015112 | 0,00644806 |
| 118 | 0,393956 | 571,7261 | 0,151931962 | 10719,34392 | 0,093485 | 1,46E-05 | 53,74241706 | 6331465,487 | 0,0595689 | 0,106815 | 0,196806 | 1,55E-06 | 9,43E-06 | 6,02E-05 | 0,001466 | 0,00201473 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 119 | 0,118561 | 381,1594 | 0,088999349 | 7794,722491 | 0,033298 | 1,68E-05 | 48,72103627 | 2129602,569 | 0,0295744 | 0,0576067 | 0,112159 | 2,00E-07 | 1,51E-06 | 1,16E-05 | 5,59E-05 | 0,000368886 |
| 120 | 1,015352 | 303,836 | 0,01492609 | 7069,98078 | 0,086906 | 2,03E-05 | 25,17648875 | 3350449,328 | 0,18142 | 0,353509 | 0,707784 | 4,57E-05 | 0,00035 | 0,002823 | 0,00513 | 0,00381825 |
| 121 | 1,677966 | 608,3986 | 0,01733088 | 12132,83121 | 0,044754 | 1,95E-05 | 44,52208354 | 583587,0288 | 0,17666 | 0,325903 | 0,617584 | 4,23E-05 | 0,000273 | 0,001872 | 0,002923 | 0,00295922 |
| 122 | 2,372844 | 450,1884 | 0,148361771 | 9053,368642 | 0,069328 | 5,24E-06 | 31,14885202 | 1820649,655 | 0,320988 | 0,608573 | 1,18538 | 0,000257255 | 0,001886 | 0,013636 | 0,014861 | 0,00670354 |
| 123 | 1,806685 | 443,9218 | 0,012812959 | 13659,27496 | 0,088962 | 1,53E-05 | 59,41694075 | 11323054,38 | 0,381432 | 0,683689 | 1,29486 | 0,000390606 | 0,002544 | 0,017144 | 0,06366 | 0,0121024 |
| 124 | 1,416487 | 470,5386 | 0,056491874 | 8713,372002 | 0,046663 | 8,11E-06 | 46,70311707 | 7435390,511 | 0,453734 | 0,8359 | 1,58647 | 0,000714844 | 0,004895 | 0,035565 | 0,022748 | 0,00793089 |
| 125 | 2,076858 | 493,8622 | 0,112890506 | 7932,217257 | 0,016555 | 1,39E-05 | 9,356385573 | 1190246,823 | 1,57347 | 3,07375 | 6,06443 | 0,0312127 | 0,242216 | 1,80489 | 0,004828 | 0,004817 |
| 126 | 1,530982 | 577,1612 | 0,149559351 | 1617,804677 | 0,054926 | 1,42E-05 | 38,94426008 | 4161175,718 | 0,30574 | 0,579357 | 1,12815 | 0,000218763 | 0,001535 | 0,011754 | 0,013349 | 0,0063198 |
| 127 | 0,499159 | 520,4944 | 0,09011504 | 2967,169246 | 0,049247 | 1,34E-05 | 92,60181262 | 7767786,911 | 0,11141 | 0,205307 | 0,378174 | 9,95E-06 | 6,56E-05 | 0,000452 | 0,003892 | 0,00279479 |
| 128 | 0,143759 | 484,4134 | 0,034175462 | 9946,259394 | 0,0342 | 1,71E-05 | 5,107958838 | 560730,2009 | 0,0544016 | 0,105933 | 0,212764 | 1,28E-06 | 1,03E-05 | 8,03E-05 | 1,11E-05 | 0,000227853 |
| 129 | 2,250202 | 626,3349 | 0,126456191 | 9490,272478 | 0,039044 | 1,28E-05 | 95,71786309 | 458287,7966 | 0,189542 | 0,330907 | 0,610105 | 4,71E-05 | 0,000276 | 0,001783 | 0,005891 | 0,00356648 |
| 130 | 1,621899 | 326,1601 | 0,12516083 | 11977,51701 | 0,003056 | 1,33E-05 | 55,45624665 | 7475218,235 | 4,8657 | 4,8657 | 4,8657 | 2,16558 | 4,04554 | 5,58152 | 0,038586 | 0,00908099 |
| 131 | 0,977408 | 605,5671 | 0,013337511 | 7288,922479 | 0,027389 | 2,18E-05 | 65,85210795 | 6546712,643 | 0,38029 | 0,700513 | 1,32928 | 0,000426922 | 0,002932 | 0,02015 | 0,009991 | 0,00515217 |
| 132 | 1,734485 | 402,0396 | 0,041657992 | 5664,728928 | 0,042894 | 1,87E-05 | 52,41743203 | 5404320,367 | 0,497154 | 0,968269 | 1,87324 | 0,000978602 | 0,007055 | 0,053183 | 0,02869 | 0,00834727 |
| 133 | 0,807444 | 359,9609 | 0,140853581 | 13263,866 | 0,034566 | 1,82E-05 | 69,3329927 | 8287474,253 | 0,323009 | 0,628956 | 1,19502 | 0,000267332 | 0,001961 | 0,014546 | 0,011186 | 0,00465879 |
| 134 | 2,435164 | 634,6431 | 0,109569655 | 3700,108176 | 0,023606 | 2,18E-05 | 90,52458523 | 8830459,877 | 1,0298 | 1,95026 | 3,70145 | 0,00906631 | 0,058744 | 0,426348 | 0,094371 | 0,0144781 |
| 135 | 0,967962 | 311,8836 | 0,063120726 | 6360,30583 | 0,062343 | 1,02E-05 | 49,42810903 | 7371676,787 | 0,255254 | 0,497173 | 0,967962 | 0,000124824 | 0,000949 | 0,007208 | 0,01317 | 0,00525879 |
| 136 | 0,942445 | 488,4254 | 0,027771193 | 11825,68724 | 0,060164 | 6,78E-06 | 87,18325847 | 5849457,834 | 0,178026 | 0,310392 | 0,571815 | 3,72E-05 | 0,000236 | 0,001557 | 0,010503 | 0,00467568 |
| 137 | 2,202116 | 525,635 | 0,059629059 | 11710,17926 | 0,019497 | 6,40E-06 | 74,11877268 | 4578459,984 | 1,01216 | 1,86429 | 3,52339 | 0,00802336 | 0,055251 | 0,372225 | 0,040705 | 0,00966826 |
| 138 | 0,432956 | 603,2191 | 0,137211588 | 13104,99496 | 0,024683 | 1,08E-05 | 93,31594544 | 6263463,421 | 0,168455 | 0,301806 | 0,571502 | 3,67E-05 | 0,000233 | 0,001512 | 0,002206 | 0,00221418 |
| 139 | 0,292492 | 586,626 | 0,168941724 | 5182,966329 | 0,068202 | 2,08E-05 | 12,41496746 | 9051495,787 | 0,113803 | 0,221598 | 0,432888 | 1,27E-05 | 9,35E-05 | 0,000696 | 0,000596 | 0,00173899 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|------------|
| 140 | 0,632943 | 380,4187 | 0,120077755 | 6082,150132 | 0,03192 | 8,39E-06 | 8,901295834 | 1432527,248 | 0,316194 | 0,615617 | 1,21525 | 0,00025177 | 0,002014 | 0,016546 | 0,00057 | 0,00156887 |
| 141 | 2,181605 | 278,8685 | 0,148899148 | 6814,560549 | 0,017921 | 6,51E-06 | 58,10819756 | 3633969,377 | 1,32366 | 2,53066 | 5,06132 | 0,0179942 | 0,140933 | 1,01606 | 0,038791 | 0,0087309 |
| 142 | 0,683073 | 574,0883 | 0,160418818 | 846,6214142 | 0,033755 | 5,93E-06 | 91,79463328 | 6690650,131 | 0,185204 | 0,350846 | 0,664375 | 4,73E-05 | 0,000333 | 0,002461 | 0,006158 | 0,0034933 |
| 143 | 1,691329 | 367,6608 | 0,102091819 | 5288,853197 | 0,044565 | 8,76E-06 | 71,24795686 | 8681674,073 | 0,541772 | 1,02619 | 1,96194 | 0,00118808 | 0,008367 | 0,063522 | 0,051743 | 0,0100556 |
| 144 | 2,269778 | 531,9838 | 0,065432321 | 12252,67543 | 0,01618 | 1,61E-05 | 63,83291054 | 7852544,864 | 1,67255 | 3,17769 | 6,083 | 0,0381209 | 0,262176 | 1,90861 | 0,067024 | 0,0130962 |
| 145 | 1,331318 | 291,5402 | 0,110438086 | 9619,442561 | 0,004323 | 1,43E-05 | 38,72847979 | 6165993,481 | 3,99395 | 3,99395 | 3,99395 | 0,862036 | 1,94376 | 2,84677 | 0,019304 | 0,00680848 |
| 146 | 1,540784 | 425,4195 | 0,011990538 | 3833,236547 | 0,084908 | 1,57E-05 | 56,20110613 | 9768167,786 | 0,307698 | 0,567093 | 1,07405 | 0,000212724 | 0,00139 | 0,009821 | 0,040295 | 0,00972482 |
| 147 | 1,215873 | 341,7612 | 0,023394256 | 6941,277852 | 0,01392 | 5,95E-06 | 82,1533498 | 4507975,026 | 0,801787 | 1,55632 | 3,11263 | 0,00428859 | 0,031689 | 0,247314 | 0,015757 | 0,00533822 |
| 148 | 1,598896 | 549,9224 | 0,082463943 | 12198,10602 | 0,079177 | 7,56E-06 | 66,89187576 | 8600640,968 | 0,302028 | 0,541427 | 0,997418 | 0,000198655 | 0,001227 | 0,008058 | 0,036509 | 0,0095061 |
| 149 | 2,336709 | 616,5053 | 0,164395168 | 4484,349635 | 0,089647 | 1,47E-05 | 78,903652 | 10667395,78 | 0,394922 | 0,688641 | 1,23399 | 0,000438668 | 0,002398 | 0,014595 | 0,098865 | 0,0151944 |
| 150 | 2,108867 | 590,8746 | 0,086732822 | 4981,705823 | 0,011163 | 5,79E-06 | 80,10479135 | 8459123,584 | 1,88726 | 3,5429 | 6,3266 | 0,0549924 | 0,373572 | 2,78919 | 0,066115 | 0,0125381 |
| 151 | 0,48737 | 559,6818 | 0,1419572 | 3037,731304 | 0,09457 | 1,31E-05 | 16,81688591 | 5222326,544 | 0,0946594 | 0,184431 | 0,359133 | 6,98E-06 | 5,15E-05 | 0,000398 | 0,001175 | 0,00220644 |
| 152 | 2,46884 | 651,001 | 0,161924292 | 10989,10815 | 0,028667 | 1,21E-05 | 27,8096213 | 261589,2675 | 0,353094 | 0,669385 | 1,26807 | 0,000357194 | 0,002451 | 0,017495 | 0,002932 | 0,00227769 |
| 153 | 0,208326 | 661,0061 | 0,124498495 | 7688,361885 | 0,081771 | 1,60E-05 | 23,70703348 | 8215045,996 | 0,0491557 | 0,0905799 | 0,176367 | 9,61E-07 | 6,41E-06 | 4,40E-05 | 0,00034 | 0,001202 |
| 154 | 1,782822 | 619,6222 | 0,020952517 | 5816,633953 | 0,056571 | 2,17E-05 | 26,00972873 | 9860964,198 | 0,620715 | 1,17565 | 2,28201 | 0,00191334 | 0,012979 | 0,093659 | 0,031984 | 0,0112525 |
| 155 | 0,837445 | 302,6474 | 0,094987153 | 11179,27191 | 0,043518 | 1,68E-05 | 41,90759064 | 10083365,73 | 0,384915 | 0,749444 | 1,4739 | 0,000455819 | 0,003539 | 0,025885 | 0,012467 | 0,00528562 |
| 156 | 2,052625 | 391,0304 | 0,076426869 | 796,9087866 | 0,040776 | 2,11E-05 | 65,1600773 | 6019285,296 | 0,621964 | 1,17813 | 2,29894 | 0,00175435 | 0,012658 | 0,09908 | 0,052216 | 0,0101835 |
| 157 | 2,139687 | 307,1307 | 0,114497164 | 4332,005298 | 0,028319 | 1,26E-05 | 40,70252515 | 10023544,74 | 1,53352 | 2,99556 | 5,90554 | 0,028049 | 0,219537 | 1,71998 | 0,080063 | 0,0135049 |
| 158 | 2,147439 | 522,2073 | 0,040382016 | 11106,41619 | 0,095707 | 8,48E-06 | 68,6110831 | 3766540,112 | 0,239044 | 0,417087 | 0,768722 | 9,25E-05 | 0,000543 | 0,003506 | 0,031193 | 0,00859416 |
| 159 | 2,353122 | 653,4699 | 0,032148067 | 7468,366619 | 0,075809 | 9,62E-06 | 24,90082978 | 4340748,52 | 0,432308 | 0,796827 | 1,50924 | 0,000647827 | 0,004332 | 0,029523 | 0,024721 | 0,0100181 |
| 160 | 1,890008 | 378,3302 | 0,117514655 | 12933,2629 | 0,091762 | 1,50E-05 | 33,07595314 | 11056492,82 | 0,471451 | 0,893168 | 1,73901 | 0,000814606 | 0,005993 | 0,044924 | 0,055836 | 0,0126606 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|-----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 161 | 1,255294 | 563,4299 | 0,077740977 | 14139,44074 | 0,070066 | 1,50E-05 | 34,32561787 | 10198291,98 | 0,359804 | 0,662908 | 1,25529 | 0,000365632 | 0,002384 | 0,016355 | 0,019183 | 0,00792292 |
| 162 | 1,222354 | 332,2136 | 0,094697809 | 12068,07907 | 0,051236 | 2,20E-05 | 83,37714431 | 7197626,448 | 0,304909 | 0,577652 | 1,09391 | 0,000208629 | 0,001478 | 0,010939 | 0,025403 | 0,00664087 |
| 163 | 1,956571 | 393,9331 | 0,080177735 | 8125,950515 | 0,067728 | 6,05E-06 | 52,51552931 | 7582811,541 | 0,449006 | 0,827411 | 1,61107 | 0,000664144 | 0,004715 | 0,033122 | 0,050838 | 0,0109548 |
| 164 | 1,148171 | 556,2395 | 0,15895273 | 10074,78286 | 0,065127 | 1,54E-05 | 18,56412809 | 11732442,82 | 0,459313 | 0,86988 | 1,69929 | 0,000826551 | 0,005666 | 0,042135 | 0,014022 | 0,00769124 |
| 165 | 2,406478 | 387,1555 | 0,050688281 | 2410,811993 | 0,045832 | 1,04E-05 | 30,19911241 | 334987,4888 | 0,267879 | 0,522386 | 1,04633 | 0,000147563 | 0,001189 | 0,009111 | 0,00421 | 0,00251164 |
| 166 | 2,48203 | 469,0512 | 0,055826001 | 7719,562499 | 0,071637 | 2,09E-05 | 37,93447745 | 11542262,74 | 0,711423 | 1,34764 | 2,58131 | 0,00278971 | 0,019392 | 0,139687 | 0,097017 | 0,0166263 |
| 167 | 1,270708 | 490,558 | 0,153393782 | 3938,669121 | 0,045604 | 1,94E-05 | 90,92305335 | 2767787,336 | 0,19214 | 0,35424 | 0,671049 | 5,26E-05 | 0,000341 | 0,002379 | 0,009651 | 0,00448816 |
| 168 | 0,134417 | 421,0808 | 0,011230432 | 1238,559214 | 0,065187 | 1,23E-05 | 29,37643759 | 5344928,112 | 0,0335296 | 0,0653109 | 0,130738 | 2,99E-07 | 2,33E-06 | 1,78E-05 | 0,000136 | 0,000608542 |
| 169 | 2,098811 | 466,508 | 0,017502067 | 2859,805936 | 0,08797 | 7,64E-06 | 8,519574043 | 9902315,249 | 0,912558 | 1,82685 | 3,60996 | 0,00636773 | 0,052256 | 0,386795 | 0,033762 | 0,0128572 |
| 170 | 1,919992 | 461,007 | 0,057743185 | 10268,01629 | 0,053305 | 1,77E-05 | 41,54273051 | 724405,0267 | 0,202141 | 0,383426 | 0,726567 | 6,34E-05 | 0,000437 | 0,003221 | 0,004961 | 0,00363106 |
| 171 | 2,198641 | 405,5694 | 0,028397353 | 8268,183934 | 0,026363 | 2,21E-05 | 70,45037242 | 854729,5209 | 0,392847 | 0,744516 | 1,44986 | 0,000463171 | 0,003244 | 0,024253 | 0,009853 | 0,0044546 |
| 172 | 1,385855 | 665,2458 | 0,118141877 | 3189,22166 | 0,08223 | 7,94E-06 | 91,19139643 | 9489058,608 | 0,221543 | 0,375752 | 0,67336 | 7,09E-05 | 0,000389 | 0,00237 | 0,032136 | 0,0084897 |
| 173 | 1,374914 | 525,0361 | 0,024399664 | 13516,69561 | 0,0477 | 8,66E-06 | 89,26637063 | 2486635,082 | 0,207896 | 0,372785 | 0,686855 | 6,30E-05 | 0,000397 | 0,00256 | 0,009767 | 0,00455901 |
| 174 | 0,723185 | 328,7991 | 0,138268599 | 362,6761404 | 0,054245 | 1,86E-05 | 56,65972916 | 9997171,894 | 0,266172 | 0,50412 | 0,983532 | 0,000137511 | 0,001052 | 0,007738 | 0,011787 | 0,00443021 |
| 175 | 1,229855 | 618,1454 | 0,020323252 | 9155,659764 | 0,085886 | 2,14E-05 | 37,17121912 | 10774379,1 | 0,282235 | 0,505845 | 0,957992 | 0,00017516 | 0,001091 | 0,007016 | 0,019342 | 0,00799708 |
| 176 | 2,163144 | 416,8256 | 0,163782732 | 5089,067581 | 0,020629 | 1,02E-05 | 32,68517757 | 688070,1786 | 0,62002 | 1,20757 | 2,3362 | 0,0018568 | 0,014023 | 0,112165 | 0,005762 | 0,00395097 |
| 177 | 0,992132 | 538,7533 | 0,031285538 | 5932,66494 | 0,088007 | 2,01E-05 | 77,73864218 | 8355261,974 | 0,158603 | 0,276581 | 0,509587 | 2,75E-05 | 0,000159 | 0,001026 | 0,01487 | 0,0057244 |
| 178 | 0,792347 | 340,6901 | 0,156203696 | 8050,919807 | 0,026816 | 1,09E-05 | 24,10035346 | 4118032,124 | 0,480745 | 0,950816 | 1,83824 | 0,000884599 | 0,006948 | 0,048981 | 0,003515 | 0,00327076 |
| 179 | 2,024918 | 330,8451 | 0,022958554 | 7627,286246 | 0,08328 | 1,56E-05 | 63,22452932 | 2815263,192 | 0,23832 | 0,439559 | 0,832859 | 9,44E-05 | 0,000641 | 0,004808 | 0,02523 | 0,00715204 |
| 180 | 0,235309 | 283,1087 | 0,047398793 | 11880,02819 | 0,070692 | 1,91E-05 | 98,71719765 | 5532961,056 | 0,038678 | 0,0713009 | 0,135059 | 3,85E-07 | 2,56E-06 | 1,89E-05 | 0,000856 | 0,00113243 |
| 181 | 1,140568 | 414,2571 | 0,010190204 | 13607,22547 | 0,030894 | 1,28E-05 | 43,27422989 | 4747397,386 | 0,456271 | 0,888442 | 1,68804 | 0,000792618 | 0,005742 | 0,042526 | 0,009847 | 0,00516364 |

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----|----------|----------|-------------|-------------|----------|----------|-------------|-------------|-----------|----------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|
| 182 | 1,853248 | 318,6195 | 0,157699895 | 13427,32369 | 0,057509 | 8,04E-06 | 46,11614649 | 10645639,25 | 0,645235 | 1,22209 | 2,37216 | 0,0020527 | 0,015232 | 0,112242 | 0,065661 | 0,0120507 |
| 183 | 0,644143 | 447,1307 | 0,032739516 | 11246,29104 | 0,058128 | 1,59E-05 | 50,67024683 | 3808068,11 | 0,121677 | 0,224268 | 0,436727 | 1,37E-05 | 9,41E-05 | 0,00066 | 0,00265 | 0,0025779 |
| 184 | 2,216591 | 541,234 | 0,10875811 | 13282,58072 | 0,041099 | 6,25E-06 | 86,34698179 | 2030589,207 | 0,344622 | 0,617928 | 1,17056 | 0,000302026 | 0,001949 | 0,012674 | 0,020526 | 0,0066792 |
| 185 | 1,558164 | 652,9102 | 0,098904416 | 9038,538913 | 0,047421 | 1,87E-05 | 99,32784563 | 8061478,309 | 0,37802 | 0,65893 | 1,1805 | 0,00038281 | 0,002198 | 0,013964 | 0,036198 | 0,00899029 |
| 186 | 1,495388 | 345,4478 | 0,060654214 | 2182,573332 | 0,073608 | 1,27E-05 | 68,05576986 | 11613797,23 | 0,36279 | 0,687326 | 1,30161 | 0,000340542 | 0,002386 | 0,01738 | 0,054734 | 0,0100171 |
| 187 | 0,187637 | 286,7617 | 0,044558983 | 10870,15247 | 0,095098 | 1,10E-05 | 17,24857491 | 6992272,437 | 0,0523083 | 0,104748 | 0,202648 | 1,12E-06 | 9,13E-06 | 7,32E-05 | 0,000301 | 0,000989084 |
| 188 | 0,265877 | 657,1645 | 0,036221247 | 11764,53975 | 0,021911 | 2,16E-05 | 15,8160515 | 9538379,044 | 0,276512 | 0,521119 | 0,797632 | 0,000172109 | 0,00128 | 0,007635 | 0,000532 | 0,00162875 |
| 189 | 0,181943 | 611,5478 | 0,151337556 | 11456,0382 | 0,006519 | 2,03E-05 | 53,07907156 | 3227228,125 | 0,211054 | 0,400275 | 0,545829 | 7,72E-05 | 0,000533 | 0,002964 | 0,00016 | 0,0006842 |
| 190 | 2,042126 | 310,7262 | 0,008569439 | 4949,558387 | 0,056147 | 1,62E-05 | 50,10393939 | 6034981,103 | 0,538513 | 1,04889 | 2,04213 | 0,00118645 | 0,008934 | 0,06797 | 0,04894 | 0,0101314 |
| 191 | 0,895192 | 548,1824 | 0,10298721 | 9425,647252 | 0,032444 | 2,06E-05 | 48,49471147 | 7752343,805 | 0,378567 | 0,716935 | 1,36069 | 0,000453749 | 0,003018 | 0,021312 | 0,008948 | 0,00501217 |