

9º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



9º CONGRESSO
Brasileiro de P&D em
PETRÓLEO E GÁS

Maceió, AL
de 09 a 11 de novembro
2017

Realização:



ABPG
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE P&D EM
PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

Estudo da formação de atmosferas explosivas via CFD

AUTORES:

Júlio César da Silva Guedes¹

André Luiz Fiquene de Brito¹

José Jaílson Nicácio Alves¹

Antônio Tavernard Pereira Neto¹

INSTITUIÇÃO:

¹Universidade Federal de Campina Grande

Este Trabalho foi preparado para apresentação no 8º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Petróleo e Gás - 9º PDPETRO, realizado pela Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás - ABPG, no período de 09 a 11 de novembro de 2017, em Maceió/AL. Esse Trabalho foi selecionado pelo Comitê Científico do evento para apresentação, seguindo as informações contidas no documento submetido pelo(s) autor(es). O conteúdo do Trabalho, como apresentado, não foi revisado pela ABPG. Os organizadores não irão traduzir ou corrigir os textos recebidos. O material conforme, apresentado, não necessariamente reflete as opiniões da Associação Brasileira de P&D em Petróleo e Gás. O(s) autor(es) tem conhecimento e aprovação de que este Trabalho seja publicado nos Anais do 9º PDPETRO.

ESTUDO DA FORMAÇÃO DE ATMOSFERAS EXPLOSIVAS VIA CFD

Abstract

The formation of explosive atmospheres is a constant threat in many processes and industrial sectors, like textile, chemical, petrochemical, biomass and recycling industries. The Brazilian standard describes the classification of hazardous areas as a method of analysis e classification of the environment where an explosive atmosphere may form, provoked by the leakage of flammable substances present in tanks, pipes and pipe fittings. The present paper has the objective of evaluate the influence of some properties of flammable gases, namely the molar mass, heat capacities at constant pressure e the polytropic coefficient in the extent and volume of the plume of gas and in the liberation ratio of said flammable gas. This was accomplished by developing a CFD model, using the software ANSYS CFX 16.0, applied to a wide range of sonic leaks. The combination of the geometry chosen for experimentation plus the parametrization of the numeric mesh proved to be adequate to the purpose of this paper, reducing the time required for the calculations, besides facilitating the visualization of the obtained data. The mass flow in the orifice outlet showed a logarithmic relation with the polytropic coefficient through the regression of the data. The molar mass influenced in the dispersion as expected. It was observed through the regression of the data that the three evaluated variables showed an exponential relation with the molar mass of the gas.

Keywords: Classification of hazardous areas; Explosive atmospheres; Gas leakage; CFD.

Introdução

A formação de atmosferas explosivas é uma ameaça presente em diversos setores industriais, como as indústrias têxteis, químicas, petroquímicas, de biomassa, reciclagem, de fertilizantes, dentre outras (MIRANDA *et al.*, 2013). Mesmo com esse perigo, tais indústrias devem ser capazes de operar de forma segura e, portanto, é necessário criar métodos de classificação das áreas de potencial risco aos trabalhadores e à própria instalação.

Assim, o vazamento de substâncias inflamáveis deve ser estudado de forma a prever o comportamento da atmosfera explosiva e para que se possa classificar o risco e tomar as medidas de segurança cabíveis de acordo com a norma vigente atual (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009), de acordo com a classificação da área estudada.

A norma brasileira exige que em regiões onde há uma alta probabilidade de se formar uma atmosfera explosiva sejam utilizados equipamentos que possuem baixa probabilidade de se tornarem uma fonte de ignição (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009). Tais equipamentos são identificados através da certificação EX e são projetados para que a probabilidade de ocorrer a liberação de faíscas ou do equipamento superaquecer sejam mínimas.

Equipamentos com certificação EX são, geralmente, muito mais caros quando comparados aos aparelhos convencionais e isso tende a ser um desestímulo para a sua implementação. Logo, a correta avaliação das áreas de risco e o controle deste são considerados não somente uma obrigação legal, mas também um fator muito importante na avaliação econômica do processo (OTSUKA, 2012).

Por tais razões, a formação de atmosferas explosivas é uma preocupação no cenário mundial e diversas normas foram elaboradas para regulamentar a classificação das áreas de risco, sendo duas delas as principais: o padrão americano e o europeu.

O padrão americano faz uso das normas API 500 e 505 do *American Petroleum Institute* e da NFPA 497, da *National Fire Protection Association*. Segundo THOMMASINI, PONS E PALAMARA (2013), tais normas são de caráter prescritivo, envolvem menos cálculos e são de fácil utilização, porém estimam a área de risco de forma muito grosseira, levando a áreas de grandes extensões quando comparada à norma europeia.

Já a norma europeia faz uso de fórmulas que não possuem justificativa científica. Da mesma forma que a norma americana, ela também tende a superestimar o tamanho e o volume da atmosfera explosiva. Isso se deve ao fato dela utilizarem em sua metodologia um volume hipotético, que depende apenas da presença de uma corrente de ar que passe pela área avaliada. Efeitos de escoamento, turbulência e do gradiente de concentração do gás inflamável são desconsiderados (BENINTENDI, 2010; MIRANDA *et al.*, 2013). A norma brasileira segue o padrão europeu e, portanto, herda todos os seus problemas e limitações.

Vários autores (BENINTENDI, 2010; MIRANDA *et al.*, 2013; OTSUKA, 2012; WEBBER *et al.*, 2011; IVINGS E GANTS, 2008) defendem que é necessário o desenvolvimento de um método de cálculo e classificação de áreas mais realista. A própria norma deixa claro que a metodologia proposta por ela não deve ser considerada o único método de avaliação e encoraja a utilização de outros métodos, como por exemplo, a modelagem computacional (ABNT NBR IEC 60079-10-1:2009, Anexo B, seção B.5.2, p 24).

Segundo OTSUKA (2012), a simulação e análise dos dados oriundos de técnicas de fluidodinâmica computacional no âmbito da classificação de áreas têm se mostrado uma alternativa mais confiável que os modelos algébricos que utilizam equações simplificadas.

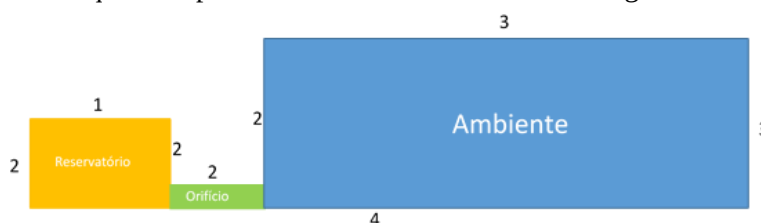
Técnicas de fluidodinâmica computacional envolvem a solução das equações que regem os balanços de massa, energia e quantidade de movimento num volume de controle situado num domínio de espaço-tempo. A resolução do modelo via CFD requer o uso de equações constitutivas e modelos de turbulência para fechamento dos graus de liberdade do sistema, sendo o uso destes bem documentado na literatura especializada (ANSYS, 2006).

Metodologia

O modelo fluidodinâmico foi desenvolvido no *software* ANSYS CFX versão 16.0 para simular o fenômeno da dispersão do gás inflamável sob altas pressões e, assim, teve de seguir alguns passos: definição da geometria, malha e modelo e a análise dos resultados.

A geometria escolhida foi uma seção de aproximadamente 4° em torno de um eixo de simetria. A razão de tal escolha é diminuir o esforço computacional, pois a geometria é aproximada para duas dimensões. As dimensões da geometria foram determinadas de modo que seus contornos não interferissem com a previsão dos resultados. A Figura 1 representa, fora de escala, a forma da geometria escolhida.

Figura 1. Esquema representativo do domínio e de suas regiões de contorno



Para a malha numérica, o processo de criação foi realizado conforme descrito por SOUZA (2016). Os elementos de malha têm forma hexaédrica, com o propósito de dar maior estabilidade à resolução do problema. Além disso, ela é bastante refinada na região da emissão do gás, a fim de melhor captar a formação dos barris e discos de Mach. No entanto, em regiões mais distantes da geometria, onde tal nível de refino não é necessário, os elementos de malha tornam-se maiores. Como a geometria é somente uma seção de 4°, foi possível manter apenas um elemento de malha ao longo da espessura do domínio. A quantidade de elementos de malha totais no domínio varia de acordo com o grau de refino desejado. Para isso, a malha foi parametrizada para depender da quantidade de elementos de malha desejados ao longo do diâmetro do orifício.

Para o modelo fluidodinâmico, foram adotadas as seguintes condições: escoamento turbulento, sem reação química, não-exotérmico e compressível, assim como consideração de gás ideal. Para as condições ambientais, foram adotadas as condições normais de temperatura e pressão para a porção do domínio que representa o ambiente externo. As condições de contorno indicadas pelos índices na Figura 1 estão dispostas no Quadro 1.

Quadro 1. Condições de contorno aplicadas à geometria

Índice	Condição de contorno
1	Condições do vaso
2	Condições de parede, <i>no-slip wall</i>
3	Condições ambientes, <i>opening pressure</i>
4	Eixo de axissimetria

As simulações foram realizadas em séries de 25 repetições a fim de avaliar a influência das propriedades do gás no comportamento da dispersão. Para verificar a influência de propriedades indiretas, que não podem ser modificadas diretamente no *software*, *e.g.* o coeficiente politrópico γ , foram manipuladas as propriedades básicas. Por exemplo, o coeficiente politrópico foi manipulado indiretamente através da mudança da capacidade calorífica à pressão constante.

As condições impostas ao reservatório e ao orifício estão dispostas no Quadro 2.

Quadro 2. Condições do reservatório de gás inflamável e do orifício

Propriedade	Valor
Diâmetro do orifício (mm)	1
Temperatura do reservatório (K)	473,15
Pressão do reservatório (Pa)	5975000
Elementos de malha na saída do orifício	25

O gás utilizado foi um gás genérico, cujas propriedades foram parametrizadas de modo a permitir a simulação de um amplo espectro de gases reais e assim, testar a influência delas na dispersão. Isso também permite que o modelo seja representativo para misturas de gases, uma vez que é possível

representá-las através de suas propriedades médias, como a massa molar, capacidade calorífica, viscosidade, condutividade térmica e limite inferior de explosividade.

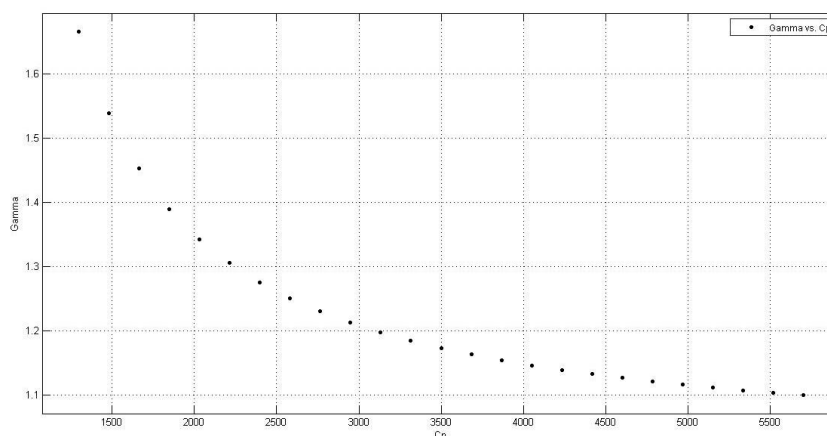
As simulações foram avaliadas no regime estacionário e o critério de convergência adotado variou na ordem de 10^{-5} a 10^{-7} . O modelo de turbulência escolhido foi o modelo k- ϵ e o número máximo de iterações foi de 2000 iterações.

As variáveis de resposta escolhidas para análise foram a extensão e o volume da pluma de gás inflamável e o fluxo mássico na saída do orifício. Após a simulação via CFD, os dados obtidos foram regredidos utilizando a ferramenta *cftool* do software MATLAB versão R2014a, a fim de obter equações simplificadas entre as variáveis de resposta e as propriedades do gás.

Resultados e Discussão

O efeito da variação do coeficiente politrópico foi avaliado indiretamente através da variação da capacidade calorífica à pressão constante do gás genérico, no intervalo de 1295,9 a 5701,9 J mol⁻¹ K⁻¹, gerando um intervalo de coeficientes politrópico de aproximadamente 1,10 a 1,67. Essa relação está disposta na Figura 2.

Figura 2. Variação do coeficiente politrópico com a capacidade calorífica à pressão constante



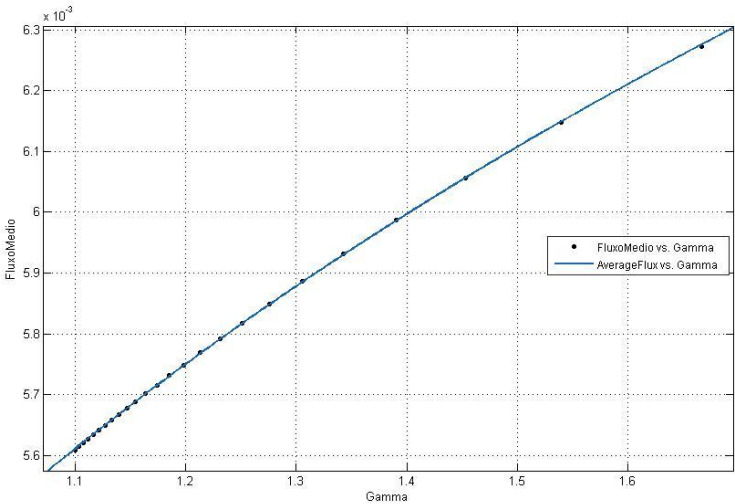
O coeficiente politrópico γ influenciou muito pouco na extensão e volume da pluma de gás inflamável. No entanto, o fluxo mássico na saída do orifício apresentou uma relação logarítmica com ela, indicada na Figura 3. A regressão dos dados forneceu a seguinte relação, com 95% de confiança:

$$fluxo = 1,601 \times 10^{-3} \ln(0,1557\gamma) + 8,435 \times 10^{-3}$$

Tabela 1. Qualidade de ajuste para a regressão do fluxo mássico em função do coeficiente politrópico

Parâmetro	Valor
R^2	0,99999
SSE	$3,443 \times 10^{-11}$
$RMSE$	$1,251 \times 10^{-6}$

Figura 3. Fluxo mássico na saída do orifício (kg s^{-1}) em função do coeficiente politrópico



A massa molar (PM) apresentou relações exponenciais com as três variáveis analisadas: volume e extensão da pluma e fluxo mássico na saída do orifício. O Quadro 3 dispõe estas relações, obtidas através da regressão dos dados.

Quadro 3. Relações entre as variáveis de resposta e a massa molar do gás inflamável

Relação com a massa molar (kg kmol^{-1})	R^2	SSE	RMSE
$\text{extensão (m)} = 2,644(PM)^{-0,7062} + 0,1085$	0,9997	8,539E-5	2,066E-3
$\text{volume (m}^3\text{)} = 0,08346(PM)^{-1,599}$	0,9959	2,473E-8	3,432E-5
$\text{fluxo (kg s}^{-1}\text{)} = 8,559\text{E-}4(PM)^{0,5586} + 2,034\text{E-}3$	0,9999	1,202E-8	2,451E-5

As Figuras 4, 5 e 6 ilustram relação entre a extensão e o volume da pluma de gás e o fluxo mássico na saída do orifício com a massa molar.

Figura 4. Extensão (m) da pluma de gás em função do peso molecular (kg kmol^{-1})

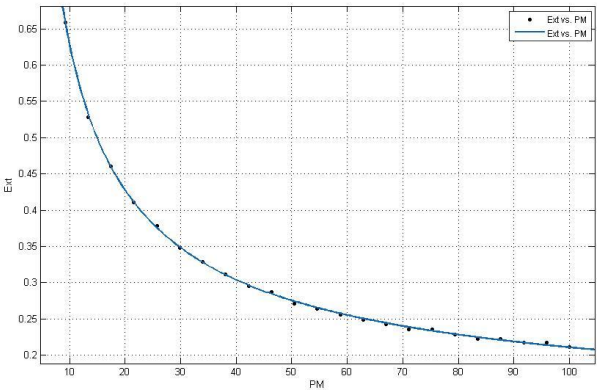
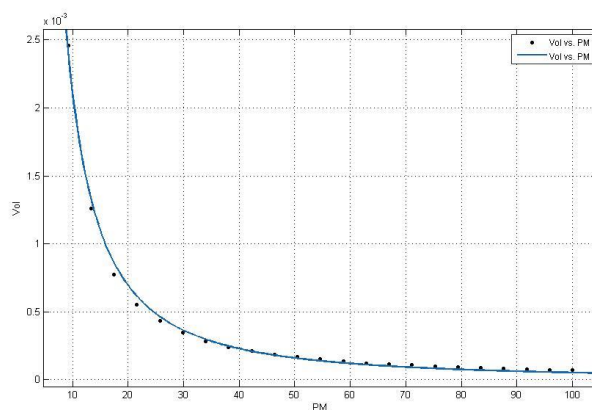
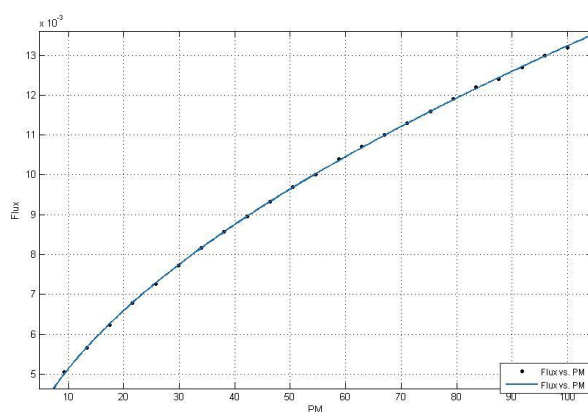


Figura 5. Volume (m^3) da pluma de gás em função do peso molecular (kg kmol^{-1})Figura 6. Fluxo mássico (kg s^{-1}) na saída do orifício em função do peso molecular (kg kmol^{-1})

Conclusões

A geometria escolhida demonstrou ser adequada para o estudo em questão, reduzindo bastante o tempo computacional, além de facilitar a visualização dos resultados.

Além disso, a parametrização da malha em função da quantidade de elementos no orifício da geometria facilitou bastante o entendimento do problema e a execução do trabalho, uma vez que diminuiu bastante o tempo necessário para informar os parâmetros necessários para o modelo fluidodinâmico.

O fluxo mássico na saída do orifício apresentou uma boa relação com o γ , sendo possível observar, através da regressão dos dados, uma relação logarítmica entre ambos, com um ótimo valor do coeficiente de correlação de Pearson.

A influência do peso molecular PM na dispersão se mostrou conforme o previsto. As três variáveis de resposta, a extensão e volume da pluma de gás e o fluxo mássico na saída do orifício, apresentaram uma boa relação com o peso molecular, observado pela regressão dos dados e pelos indicadores de qualidade desse ajuste.

Agradecimentos

Ao FNDE, por disponibilizar os recursos para um dos autores, através de bolsa do Programa de Educação Tutorial, e a todos que contribuíram de alguma forma com a execução deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ANSYS, Inc. **Solver Theory Guide, ANSYS CFX Release 11.0**. South point, Canonsburg, 2006.

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

BENINTENDI, R. **Laminar jet modelling for hazardous area classification**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 24, 2011, Pg. 123-130.

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.

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-generated Atex explosive atmospheres**. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, Vol. 26, 2013, Pg. 839-850.

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

SOUZA, A. O. **Estudo e Inovação em classificação de áreas de atmosferas explosiva via fluidodinâmica computacional**. Tese de Doutorado em Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

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

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