**ANÁLISE DE CONSEQUÊNCIA DE VAZAMENTOS DE GASES INFLAMÁVEIS**

Mariana Alves da Silva, Fernanda Marques de Moura, Adriana MirallesSchleder

Universidade Estadual Paulista

Marcelo Ramos Martins

Universidade de São Paulo

**RESUMO**

A análise histórica de acidentes envolvendo gases inflamáveis revelam a ocorrência de um grande número de acidentes com graves consequências, o que estimula a busca por segurança nos processos industriais e incentiva a pesquisa no âmbito da análise de riscos. Nestas instalações, um evento indesejado potencial, é a formação de jatos de fogo (*jetfires*), que é resultante do fenômeno conjunto de vazamento de um gás inflamável pressurizado e seu encontro com uma fonte de ignição próxima ao ponto de liberação. Os seus efeitos podem ser danosos para a indústria, uma vez que geralmente afetam equipamentos que podem falhar posteriormente, o que amplia a escala do acidente. Portanto, para compreender os jatos de fogo, faz-se necessária a utilização de modelos que avaliem os efeitos gerados e suas características, como os modelos físicos, que através das ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) utiliza métodos numéricos e algoritmos para resolver problemas que envolvem fluxos de fluidos. Porém, mesmo tendo apresentado resultados promissores, alguns estudos apontam para possíveis distorções encontradas nos resultados obtidos por estas ferramentas em função do grande número de variáveis de entrada e das incertezas associadas ao fenômeno. Visto que as ferramentas CFD devem ser desenvolvidas a um nível que possam ser usadas com confiança para prever as consequências de cenários realistas, o objetivo deste trabalho é efetuar a comparação entre os dados experimentais de jatos de fogo apresentados em uma tese e os resultados de simulações realizadas pela ferramenta *FLameACceleration Simulator* (FLACS), para avaliar as consequências da formação de jatos de fogo e a performance da ferramenta. Dessa forma, conclui-se que o software FLACS, em geral, possui um bom desempenho ao simular jatos de fogo, visto que consegue reproduzir o cenário de maneira adequada. No entanto, a necessidade de diversos parâmetros de entrada, erros na resolução do modelo e a acuracidade e integridade dos dados experimentais podem comprometer a execução da simulação e o seu resultado.

1. **INTRODUÇÃO**

A análise histórica de acidentes envolvendo gases inflamáveis revelam a ocorrência de grande número de acidentes com graves consequências, o que estimula a busca por segurança nos processos industriais e incentiva a pesquisa de análise destes riscos, em especial, a avaliação de possíveis danos gerados por vazamentos destas substâncias e a estimativa da extensão dos efeitos físicos de acidentes [1, 2].

Os principais efeitos dos acidentes envolvendo substâncias tóxicas e inflamáveis incluem formação de nuvem tóxica, incêndio em poça, formação de jato de fogo, incêndio em nuvem, explosão de nuvem de vapor, explosão confinada e contaminação ambiental. Em ambientes industriais nos quais utiliza-se gases inflamáveis, é de suma importância conhecer os riscos associados à vazamentos, incêndios ou explosões, visando a segurança das instalações, o que faz ser crescente o número de estudos que analisam tais riscos. Sendo assim, é necessário analisar os riscos de potenciais liberações indesejadas em instalações que lidam com esse tipo de gás.

Conforme mencionado anteriormente, uma das possíveis consequências de uma liberação acidental de um gás inflamável é a formação de jato de fogo. O jato de fogo, *jetfire*, é um incêndio resultante do fenômeno conjunto do vazamento de um gás inflamável pressurizado e o seu encontro com uma fonte de ignição próxima ao ponto de liberação, o qual pode resultar na combustão da substância inflamável, cujo os efeitos podem ser danosos para a indústria. Por isso, é importante compreender os potenciais perigos de um vazamento de gás inflamável e analisar suas consequências.

O efeito direto de um jato de fogo, a radiação térmica, nem sempre é classificado como um dos mais graves dos diversos efeitos que podem ocorrer após liberações de substâncias inflamáveis em instalações industriais. No entanto, os jatos de fogo, comumente, afetam equipamentos que podem falhar posteriormente, ampliando a escala do acidente e gerando um efeito dominó que pode resultar em graves consequências. Além disso, podem ser muito intensos localmente, uma vez que são caracterizados por fluxos de calor muito altos.

Portanto, para compreender os jatos de fogo, faz-se necessária a utilização de modelos que avaliem os efeitos gerados e suas características. Estes modelos podem ser modelos empíricos, integrais ou físicos. Os modelos empíricos são os modelos mais simples, e utilizam correlações empíricas para compreender o fenômeno; enquanto os modelos integrais buscam utilizar princípios físicos do fenômeno, tendo como base equações diferenciais e algébricas. Já os modelos físicos são aplicados através das ferramentas de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD), que vem ganhando adeptos devido a sua maior acuracidade em representar cenários mais complexos.

Ao contrário dos métodos empíricos e integrais, os modelos físicos envolvendo CFD podem avaliar os efeitos dinâmicos detalhados em um campo próximo e distante do ponto de liberação. Isto é importante ao avaliar danos reais durante uma análise de risco de uma instalação, pois a aplicabilidade dos modelos empíricos e integrais é limitada em cenários complexos, e por isso, vários grupos de pesquisa têm se concentrado no uso das ferramentas CFD [3].

No entanto, existem muitos desafios na aplicação de ferramentas CFD, sendo um dos principais desafios que estas exigem mais informações sobre a instalação real, incluindo detalhes de geometria e informações de processo. Além disso, para as ferramentas CFD serem utilizadas como ferramenta preditiva, é necessário que sejam validadas, e sua capacidade de prever fenômenos de incêndios devem ser demonstradas. A validação é inevitável, uma vez que garante a qualidade das previsões, sendo necessário dados experimentais para comparar as simulações da ferramenta CFD com o cenário real.

Na atualidade, existem diversas ferramentas CFD que podem ser utilizadas, porém, nem todas foram devidamente validadas. Dentre essas ferramentas CFD, o FLACS é recomendado para simulações que envolvem dispersão, incêndio e/ou explosão de gases inflamáveis, sendo considerado uma das principais ferramentas de CFD usadas para prever as consequências da liberação de gases inflamáveis. Alguns autores consideram a ferramenta adequada para tais simulações, outros apontam algumas limitações. À vista disso, [4] e [5] validaram os resultados de suas simulações contra um conjunto de dados experimentais encontrados na literatura, que envolvem fenômenos de incêndio e explosão. Dessa forma, averiguaram que o FLACS pode ser considerado uma ferramenta adequada para simular com precisão o fenômeno de liberação de gás inflamável.

Visto que a literatura encontrada em relação a validação da ferramenta FLACS para a formação de jatos de fogos é limitada, e as ferramentas CFD devem ser desenvolvidas a um nível que possam ser usadas com confiança para prever as consequências de cenários realistas de acidentes, o objetivo deste trabalho é comparar parâmetros de simulação de jatos de fogo realizadas pelo FLACS com os dados obtidos experimentalmente, e assim, contribuir para o estudo dos riscos envolvidos na liberação pressurizada de gases inflamáveis, principalmente em instalações e atividades industriais que utilizam esse tipo de gás.

1. **METODOLOGIA**

Em um primeiro momento, foi realizado o levantamento dos dados experimentais presentes na literatura para jatos de fogo, para assim, ser selecionado um conjunto de dados para compará-los com os resultados obtidos pela simulação. O estudo de [6] foi o que apresentou informações mais detalhadas, como os procedimentos realizados para os testes de campo, resultados obtidos, condições de testes e um foco significativo em relação a radiação emitida pelos jatos de fogo, sendo selecionado para a fase de comparação entre dados experimentais e valores estimados pelas simulações CFD.

Dessa forma, a partir da descrição dos testes de campo, foram levantados os dados de entrada necessários para realizar a simulação, como os parâmetros do cenário (Tabela 1 a Tabela 3), obtidos de acordo com o cenário experimental descrito; e os parâmetros de simulação (Tabela 4), geometria e representação da malha, estimados também de acordo com a descrição experimental e com as necessidades da simulação.

Tabela 1 – Valores experimentais para a construção do cenário

|  |  |
| --- | --- |
| Parâmetro | Valor experimental |
| Temperatura ambiente | 30,35°C |
| Pressão atmosférica | 9,5 bar |
| Umidade relativa | 47% |
| Volume do reservatório | 4 m³ |
| Temperatura do reservatório | 25°C |
| Direção do vazamento | +Z |
| Coordenadas do vazamento | (0; 0; 0,5) m |
| Composição do gás | 98,5% de propano e 1,5% de butano |

Tabela 2 – Dados de entrada para cada diâmetro de saída

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Dados de entrada | 20 mm | 30 mm |
| Vazão mássica - m (kg/s) | 0,27 | 0,25 |
| Velocidade de saída – V (m/s) | 110 | 120 |
| Pressão de estagnação - Pin (bar) | 3,47 | 1,49 |
| Temperatura de saída - Tor (ºC) | -20 | -20 |
| Área expandida estimada (m²) | 0,036 | 0,069 |
| Início do vazamento (s) | 6 | 6 |
| Duração do vazamento (s) | 20 | 20 |
| Momento de ignição (s) | 7 | 8 |

Tabela 3 – Parâmetros assumidos para construir o cenário

|  |  |
| --- | --- |
| Parâmetro | Valor assumido |
| Rugosidade do solo | 0,03 m |
| Velocidade do vento em uma altura de referência | 0,01 m/s |
| Altura de referência | 1 m |
| Direção do vento | 255,3° |
| Tempo de acúmulo do vento | 5 s |
| Classe Pasquill | E |
| Razão de equivalência |  |

Tabela 4 – Valores assumidos para os parâmetros de simulação

|  |  |
| --- | --- |
| Parâmetro | Valor assumido |
| Dados de saída 3D | FMOLE; T; Q; QRAD |
| Tempo mínimo de simulação (s) | 25 |
| Tempo máximo de simulação (s) | 25 |
| CFLC | 20 |
| CFLV | 2 |
| MODD | 10 |
| DTPLOT (s) | 1 |

1. **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

ATabela 5 apresenta a comparação entre os dados experimentais e simulados para os diâmetros de saída de 20 e 30 mm.

Tabela 5 – Comparação do fluxo de calor entre os dados experimentais e simulados

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Distância do sensor de calor em x (m) | 1,1 (MP 5) | 3 (MP 7) | 5 (MP 6) |
| 20mm | | | |
| Valor experimental (kW/m²) | - | 4,20 | 2,20 |
| Valor obtido na simulação (kW/m²) | 4,18 | 2,22 | 1,04 |
| Erro relativo percentual (%) | - | 47,14 | 52,73 |
| 30mm | | | |
| Valor experimental (kW/m²) | 8,88 | 4,85 | 2,85 |
| Valor obtido na simulação (kW/m²) | 27,72 | 11,15 | 5 |
| Erro relativo percentual (%) | 212,16 | 129,90 | 75,44 |

A partir dos dados apresentados naTabela 5, pode-se observar que para o diâmetro de saída de 20 mm, o fluxo de calor simulado foi, aproximadamente, 50% menor que o experimental. Dada as circunstâncias para realizar a simulação e as estimativas feitas, esse erro relativo percentual é aceitável; porém, vale ressaltar que não deixa de ser necessário buscar maneiras de minimizá-lo.

Para o diâmetro de saída de 30 mm, observa-se que o erro relativo percentual está elevado, o que indica uma grande quantidade de erros que podem estar incorporados a obtenção dos dados. Nota-se também que o erro relativo percentual aumenta, à medida que o sensor está próximo ao jato de fogo, ao contrário do que acontece para o diâmetro de saída de 20 mm.Além disso, nos valores obtidos pela simulação, a diferença do fluxo de calor entre os sensores para o diâmetro de saída de 30 mm é consideravelmente grande, o que demonstra que a simulação para esse diâmetro não conseguiu atingir um bom desempenho.

Pode-se observar que, tanto nos dados experimentais como nos dados simulados, o fluxo de calor diminui para ambos os diâmetros, à medida que o sensor de calor se distancia do jato. Esse é um comportamento lógico e esperado, visto que quanto mais longe o sensor de calor está localizado, uma quantidade maior de calor é absorvida pela atmosfera. Vale ressaltar que o decréscimo do fluxo de calor em função da distância é significativo para distâncias curtas, indicando que o risco associado à radiação térmica de um jato de fogo tem um alcance curto; porém, próximo a chama esse risco aumenta consideravelmente.

1. **CONCLUSÃO**

A partir da análise e comparação dos resultados, foi possível realizar a validação do FLACS, que em termos gerais, mostrou bom desempenho ao simular jatos de fogo, principalmente no que concerne a capacidade de reproduzir o cenário real a partir da possibilidade de introduzir diversos parâmetros para representar o cenário da melhor maneira possível. Porém, também foi possível notar que existem incertezas intrínsecas ao se utilizar ferramentas CFD, relacionadas principalmente a malha utilizada para a resolução do modelo. Ademais, de acordo com os erros que ocorreram durante a execução da simulação, foi possível averiguar que a vazão mássica é um parâmetro que influencia notavelmente a resolução do modelo e os resultados obtidos.

1. **REFERÊNCIAS:**

[1] EUROPEAN GAS PIPELINE INCIDENT DATA GROUP, “Gas pipeline incidentes”, (2018);

[2] ZIMMERMANN A. T., “Análise de Riscos de um Vazamento de Gás Natural em um Gasotudo”, *Universidade Federal de Santa Catarina,* p. 120, (2009);

[3] HANSEN O. R., JOHNSON D. M, “ImprovedFar-Field BlastPredictionsfrom Fast Deflagrations, DDTS andDetonationsofVapour Clouds using FLACS CFD”, *JournalofLossPrevention in the Process Industries*, v. 35, p. 293, (2015);

[4] HANSEN O. R. *et al*., “UsingComputationalFluid Dynamics (CFD) for BlastWavePredictions”, *JournalofLossPrevention in the Process Industries*, v. 23, p. 885, (2010);

[5] ROSAS A. P.,“Studyof Jet FiresGeometryandRadiativeFeatures”, *UniversitatPolitècnica de Catalunya*,(2011).