

Modelagem de Consequências de Incêndios de Gás Hidrogênio

Dr. Franz Zdravistch
Chief Training Engineer
Gexcon AS
Bergen, Noruega

Dr. Deiveegan Muthusamy
R&D Department Manager
Gexcon AS
Bergen, Noruega

1. INTRODUÇÃO

O uso de hidrogênio como combustível limpo convencional para transporte e outras aplicações está sendo proposto como uma alternativa aos combustíveis de hidrocarbonetos tradicionais. Em particular, a União Europeia (UE) encomendou vários estudos para avaliar a eficácia e os riscos potenciais dessa abordagem em que a Gexcon AS participou. Nesse contexto, é necessária uma análise quantitativa de riscos 3D (3D-QRAs) para proteger a segurança do público em geral.

Para garantir que informações de consequências precisas sejam usadas para QRAs 3D, uma validação sistemática da ferramenta de Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) FLACS-Fire está sendo realizada para incêndios com gás hidrogênio. O principal objetivo deste trabalho é, além de incluir modelos que capturem a física correta, uma extensa validação contra experimentos de pequena e grande escala disponíveis (com estudos sobre variações de vários parâmetros importantes que podem afetar cargas de calor e, portanto, riscos). O processo compreende identificar e modelar cenários relevantes de jatos de hidrogênio gasoso, incluindo os casos mais importantes (para identificar validade, limitações e desempenho) na matriz de validação e relatar o status da validação.

Neste artigo, é fornecida uma descrição do protocolo de avaliação do modelo, são apresentados os detalhes dos modelos considerados para validação seguidos por vários exemplos específicos de validação.

2. PROTOCOLO DE VALIDAÇÃO DE MODELOS

Esta seção descreve o protocolo de avaliação de modelo (MEP) adotado pela GexCon para o trabalho de validação relacionado ao FLACS-Fire. A validação com soluções analíticas, experimentos e incidentes reais é a abordagem preferida para documentar a variedade de cenários para os quais um sistema de modelagem gera estimativas confiáveis para fenômenos físicos relevantes. A validação sistemática também é essencial para a garantia da qualidade: monitorando continuamente os efeitos das alterações no código fonte, nos compiladores e nos sistemas operacionais, por exemplo. No passado, a GexCon documentava a validação do FLACS em relatórios e publicações, geralmente caso por caso. No entanto, é necessário implementar uma abordagem mais sistemática da validação.

O protocolo de avaliação de modelo (MEP) adotado para o FLACS-Fire segue as recomendações do Protocolo de Avaliação de Modelo de Explosão de Gás (MEGGE) [1], incluindo o uso de métodos para análise estatística de acordo com a prática sugerida por Hanna [2-4]. MEGGE requer uma avaliação em seis etapas:

1. Descrição do modelo
2. Descrição do banco de dados
3. Avaliação científica
4. Avaliação orientada ao usuário
5. Verificação
6. Validação

Dessas etapas, este artigo aborda a descrição do modelo e a validação do banco de dados. Certas características são essenciais para a estrutura integrada de validação de modelos:

- O banco de dados de validação pode ser aplicado a qualquer sistema de modelo relevante
- O MEP define a estrutura geral do banco de dados:
 - Critérios inequívocos e documentados para classificar e priorizar casos de validação

- Critérios inequívocos e documentados para avaliar e classificar o desempenho do modelo
- A metodologia inclui ferramentas para configurar, executar e processar resultados de simulações, além de formatos de arquivos bem definidos e documentados para armazenar dados de experimentos e simulações
- Foco inerente na documentação do desempenho do modelo em relatórios, manuais e material de treinamento
- Potencial significativo de valor agregado na forma de qualidade do produto e velocidade de desenvolvimento:
 - Teste automatizado, que é um requisito para integração contínua
 - Estudos de sensibilidade, que permitem aos modeladores caracterizar o sistema do modelo
 - Otimização de parâmetros, essencial para modelos que dependem de correlações empíricas

3. BASE DE DADOS - CATEGORIZANDO E PRIORIZANDO CASOS DE VALIDAÇÃO



O banco de dados contém instâncias na forma de casos de validação: soluções analíticas, experimentos, incidentes reais etc. As validações podem ser classificadas em instâncias de acordo com fenômenos físicos que correspondem às áreas de aplicação do software FLACS-Fire, por exemplo, incêndios a jato, incêndios em poças, bolas de fogo, incêndios em nuvens de gás. Dentro de cada área de aplicação e subcategoria, a priorização considera seis parâmetros: relevância e contexto, escala espacial, repetibilidade, qualidade da medição, disponibilidade de dados e finalmente materiais. A prioridade de uma instância no banco de dados normalmente será uma pontuação média destes parâmetros.

3.1 RELEVÂNCIA E CONTEXTO

O primeiro e principal critério em relação à priorização de casos de validação é a área de aplicação para o sistema de modelos e até que ponto os fenômenos físicos encontrados em um experimento são representativos para os eventos que devem ser simulados. Certos experimentos representam o estado da arte em relação aos sistemas de modelos de avaliação comparativa para aplicações específicas, por exemplo, comprimento da chama e fluxo de calor em um alvo, e devem sempre ser incluídos no banco de dados de validação. Da mesma forma, certos acidentes poderiam ditar a legislação futura e as melhores práticas no campo da segurança de processos e também devem ser incluídos.

3.2 ESCALA ESPACIAL

A Tabela 1 resume as categorias para classificar escalas espaciais para a aplicação de incêndios gasosos. Os mesmos princípios se aplicam a outras áreas de aplicação. Os fenômenos que governam os resultados obtidos em experimentos de laboratório em pequena escala podem não ser igualmente importantes em grande escala e vice-versa. Como o FLACS é uma ferramenta para aplicações industriais, experimentos em grande escala geralmente são favorecidos no processo de priorização.

Escala espacial	Exemplo típico
Grande escala: <ul style="list-style-type: none"> • Escala realista: planta de processo real • Tipicamente, no caso de incidentes reais 	
Escala grande: <ul style="list-style-type: none"> • Seção limitada de uma planta em escala real • Possivelmente numa escala pouco reduzida • Volumes normalmente acima de 100 m³ 	




<p>Escala média:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Escala um pouco reduzida em relação à realidade • Volumes tipicamente na faixa de 10-100 m³ 	
<p>Escala pequena:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diminuição significativa em relação à realidade • Volumes tipicamente na faixa de 0,1-10 m³ 	
<p>Escala de laboratório:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Experimentos típicos de laboratório • Volumes inferiores a 0,1 m³ 	

Tabela 1

3.3 REPEATABILIDADE

A divulgação significativa dos resultados representa um desafio inerente à validação do modelo. O experimento que mostra boa repetibilidade provavelmente seja controlado por parâmetros de entrada ou condições de contorno conhecidos e, portanto, mais provavelmente reproduzido por um modelo adequado. A repetibilidade deve caracterizar os fenômenos físicos em vez de ser uma medida de qualidade dos dados.

3.4 MEDIÇÃO DA QUALIDADE

É essencial conhecer as características do sistema de medição e se e como os dados originais foram processados: especificações de filtro, técnicas de média etc. As diretrizes do MEGGE [1] mencionam vários critérios para a qualidade da medição experimental, incluindo a calibração de transdutores, detectores de chamas e sondas de concentração, frequência e localização da calibração do instrumento (in situ ou em laboratório). correção de dados para contabilizar erros do instrumento, barras de erro ou valores de incerteza para as grandezas medidas e estimativas para a variabilidade inerente nas variáveis medidas.

Também é importante avaliar se os parâmetros relevantes foram medidos, bem como a densidade das medições. Os dados dos experimentos de incêndio podem ser limitados ao fluxo de calor fora da chama ou, às vezes, dentro da chama, enquanto parâmetros como o comprimento da chama etc. poderiam ser mais úteis.

3.5 DISPONIBILIDADE DE DADOS

A Tabela 2 resume a classificação dos dados experimentais em relação à disponibilidade. Ainda pode valer a pena simular experimentos ou acidentes onde dados limitados estão disponíveis, mas com cautela.

Escala	Descrição
Bom	Todas as informações necessárias disponíveis: relatórios, dados com o sem processamento, vídeos, etc.
Moderado	Informações mais relevantes estão disponíveis: relatórios, publicações, etc.
Pobre	Falta de informação significativa: apenas medições pontuais, repetibilidade, etc.
Nenhum	Informações insuficientes para completar a modelagem

Tabela 2

3.6 MATERIAIS

Experimentos com diferentes materiais, por exemplo, experimentos com diferentes combustíveis (hidrogênio puro e multicomcombustível, incluindo hidrogênio) no mesmo equipamento de teste, geralmente serão

mais valiosos do que experimentos limitados a um material. Experimentos com materiais exóticos podem ser menos relevantes do que experimentos com materiais usados frequentemente.

3.7 PRIORIDADE

O processo de priorização com base nas métricas detalhadas acima resulta em uma lista classificada de casos de validação para cada área de aplicação e subcategoria. A Tabela 3 resume essas diretrizes,

Pontuação	Prioridade	Descrição
8.0 – 10	Essencial	Experimentos de alta relevância e repetidos, amplo acesso aos dados, testes em grande escala, etc.
6.5 – 8.0	Alta	Experimentos muito relevantes, bom acesso aos dados, escala bastante grande, alguns testes repetidos, etc.
4.0 – 6.5	Moderada	Experimentos relevantes mas não necessariamente repetidos, acesso suficiente aos dados, escalas modestas, etc.
2.0 – 4.0	Baixa	Experimentos pouco relevantes, baixa repetibilidade, acesso limitado a dados, pequena escala, etc.
0.0 – 2.0	Em-espera	Experimentos não particularmente relevantes, qualidade questionável, pequena escala, sem acesso a dados, etc.

Tabela 3

4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO

O desempenho dos modelos é uma função de quão bem os modelos implementados reproduzem resultados experimentais. De acordo com [1], a representação adequada de variáveis de alta relevância para a aplicação final, como carga de calor ou temperatura de chama no caso de incêndios a jato, é favorecida sobre variáveis mais periféricas em relação à aplicação industrial. A avaliação considera os valores reais e as tendências observadas em resposta à variação nos parâmetros de entrada.

4.1 AVALIAÇÃO ESTATÍSTICA

A avaliação estatística de um estudo de validação pode utilizar parâmetros como (Hanna) [3,4]:

- Tendência fracionária, FB
- Tendência média geométrica, MG
- Erro quadrático médio, RMSE
- Erro médio quadrático normalizado, NMSE
- Variação média geométrica, VG
- Coeficiente de correlação, R
- Fração dentro de um fator de dois, FAC2

A tendência fracionária FB se define como:

$$FB = \frac{(\langle PO \rangle - \langle PP \rangle)}{0.5(\langle PO \rangle + \langle PP \rangle)} \quad (1)$$

$$\langle X \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

onde PP é o valor predito, PO é o valor observado e o operador $\langle \rangle$ é a média aritmética

A tendência média geométrica (MG) é uma medida da tendência sistemática:

$$MG = \exp \left(\left\langle \ln \left\{ \frac{PP}{PO} \right\} \right\rangle \right) \quad (3)$$

O erro médio quadrático normalizado (NMSE) se define como:

$$NSME = \frac{\langle (PO - PP)^2 \rangle}{\langle PO \rangle \langle PP \rangle} \quad (4)$$

A variação média geométrica (VG) é uma medida da probabilidade de obtenção de concordância dentro de certos limites definidos como (MEGGE) [1]:

$$VG = \exp \left(\left\langle \left(\ln \left\{ \frac{PP}{PO} \right\} \right)^2 \right\rangle \right) \quad (5)$$

O coeficiente de correlação (R) se define como:

$$R = \frac{\langle PO - \langle PO \rangle \rangle \langle PP - \langle PP \rangle \rangle}{\sigma_{PP} \sigma_{PO}} \quad (6)$$

onde σ_{PP} e σ_{PO} são os desvios padrão para as quantidades previstas e observadas, respectivamente. A fração dentro de um fator de dois, FAC2, é a fração dos dados que satisfaz:

$$0.5 \leq \frac{PP}{PO} \leq 2 \quad (7)$$

MG e VG são visualizados em gráficos de parábola e FAC2 são visualizados em gráficos de 'scatter'.

4.2 VISUALIZAÇÃO

A Figura 1 mostra um gráfico típico de 'scatter' (neste caso, para pressões de explosão geradas durante vários experimentos de explosão realizada em diferentes geometrias usando metano). Esse tipo de representação gráfica representa uma maneira rápida e direta de comparar resultados de experimentos e simulações, bem como resultados obtidos com vários modelos. A diagonal ($y = x$) representa concordância perfeita, pontos acima da diagonal representam superpredição e pontos abaixo da diagonal representam subpredição. A Figura 2 mostra um gráfico de parábola, isto é, uma apresentação gráfica em que a tendência média geométrica (MG) para um determinado conjunto de dados é plotada contra a variação média geométrica (VG). A tendência para a super ou subpredição sistemática é representada pela média geométrica. A variação é uma medida da probabilidade de obter previsões dentro de certos limites. A parábola representa a curva da variância zero, a linha $x = 1$ representa resultados imparciais e a concordância perfeita é no ponto (1,1).

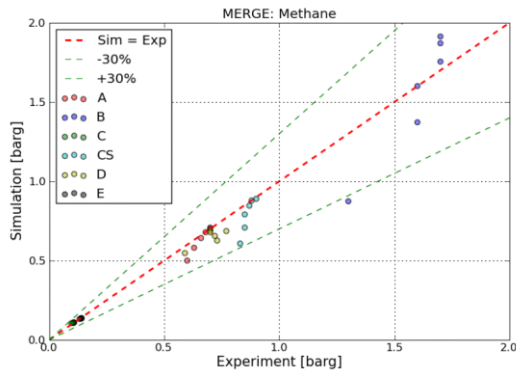


Figura 1 - Sobrepressões experimentais vs simulações de explosão com metano

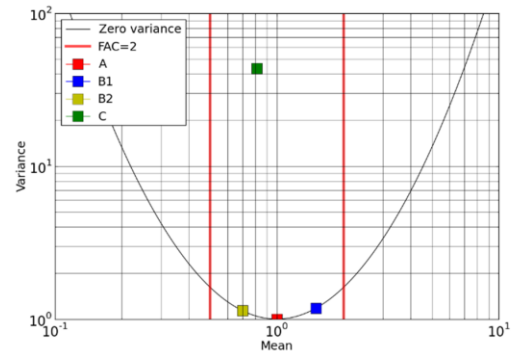


Figura 2 - Gráfico de parábola representando os conjuntos de dados nas Figuras 3, 4 e 5 abaixo

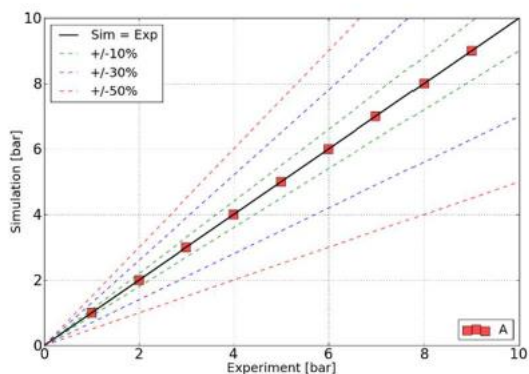


Figura 3 - Conjunto de dados com concordância perfeita

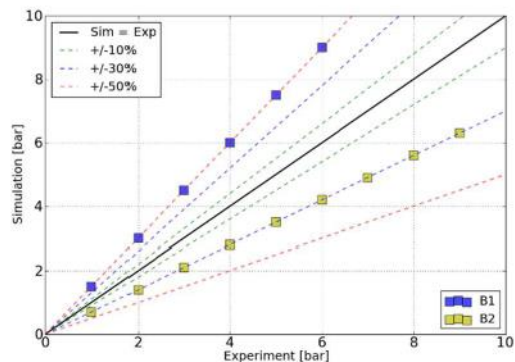


Figura 4 - Conjunto de dados com superpredição e subpredição sistemática

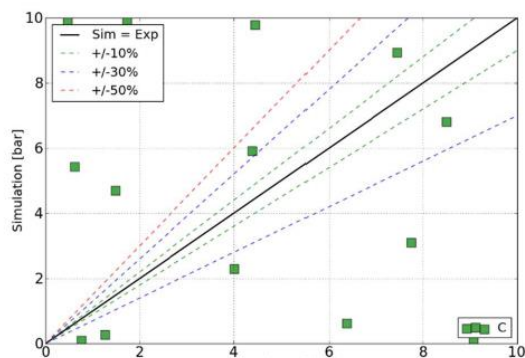


Figura 5 - Conjunto de dados com plotagem Scatter para conjunto de dados com alta variação

4.3 DESEMPENHO DO SISTEMA DE MODELAGEM

A Tabela 4 resume as categorias qualitativas usadas para avaliar o desempenho da simulação neste relatório. Todos os requisitos na descrição precisam ser atendidos para serem classificados de acordo com uma determinada categoria de resultado da simulação. É importante declarar explicitamente o contexto e a motivação para um estudo de validação e consultar a descrição detalhada antes de tomar decisões com base nas notas de desempenho. A Tabela 3 fornece um formato adequado para apresentar resultados de validação para incidentes singulares do banco de dados, por exemplo, em relatórios e publicações.

Resultado da simulação	Descrição
5 – Excelente	<ul style="list-style-type: none"> As variáveis relevantes são reproduzidas em $\pm 20\%$ Dependência da malha é menor que 20% para tamanhos de volume de controle comparáveis As tendências previstas dos parâmetros principais são consistentes com o experimento
4 – Muito bom	<ul style="list-style-type: none"> As variáveis relevantes são reproduzidas dentro de $\pm 30\%$ Dependência da malha é menor que 30% para tamanhos de volume de controle comparáveis As tendências previstas dos parâmetros principais são consistentes com o experimento
3 – Bom	<ul style="list-style-type: none"> As variáveis relevantes são reproduzidas dentro de $\pm 50\%$

	<ul style="list-style-type: none"> Dependência da malha é menor que 30% para tamanhos de volume de controle comparáveis As tendências previstas dos parâmetros principais são consistentes com o experimento
2 – Moderado	<ul style="list-style-type: none"> As variáveis relevantes são reproduzidas ~ um fator de 2 Dependência da malha é menor que 50% para tamanhos de volume de controle comparáveis As tendências previstas dos parâmetros principais são consistentes com o experimento
1 – Pobre	<ul style="list-style-type: none"> As variáveis relevantes não são reproduzidas ~ um fator de 2, e/ou Dependência da malha é menor que 50% para tamanhos de volume de controle comparáveis, e/ou As tendências previstas dos parâmetros principais são consistentes com o experimento, e/ou Os resultados não são robustos com perturbações razoáveis em condições iniciais / de contorno
0 – Não aplicável	<ul style="list-style-type: none"> FLACS não deve ser usado para simular esse tipo de cenário.

Tabela 4 - Diretrizes para avaliar os resultados da simulação

Um banco de dados é essencial para organizar o conhecimento relacionado à validação. Para uma determinada aplicação e subcategoria, as instâncias no banco de dados serão simuladas e analisadas de acordo com a prioridade atribuída, com foco especial na análise de sensibilidade para variáveis como constantes críticas do modelo, resolução espacial e temporal, condições iniciais e de contorno, etc. O sistema de modelos incluirá ferramentas personalizadas para configurar, documentar e executar simulações, garantia de qualidade (QA) e programas utilitários para extração e redução de dados, incluindo formatos de arquivo padrão para visualização de resultados experimentais e simulados.

5 CASOS DE VALIDAÇÃO DE FLACS-FIRE

O FLACS-Fire é um dos módulos disponíveis no FLACS e usa muitos dos mesmos componentes de software e modelos subjacentes disponíveis no FLACS para dispersões e explosões de gás, incluindo o pré / pós-processador, modelo k-epsilon de turbulência, o conceito de porosidade distribuída e o esquema SIMPLE de correção de pressão. Para capturar a física específica de incêndios, inclui vários modelos para modelar a combustão e a radiação de calor, em particular o Eddy Dissipation Concept (EDC) para combustão, o Discrete Transfer Model (DTM) e o modelo WSGGM para radiação de calor e o modelo de fuligem de FOX.

O FLACS-Fire foi validado para uma ampla gama de casos de teste e geralmente tem um bom desempenho para hidrocarbonetos comuns. Os casos de validação incluem vários incêndios de jato (hidrogênio, metano, propano, etileno), incêndios de nuvens de gás, incêndios em compartimentos (sobre e sob ventilados) e vários incêndios em poças.

5.1 FOGO DE JATO DE HIDROGÊNIO HORIZONTAL DA GL EM GRANDE ESCALA

Dois experimentos de incêndio de jato de hidrogênio em grande escala foram conduzidos no Local de Teste da GL Noble Denton Spadeadam em North Cumbria, Reino Unido (Ekoto) [5]. O gás hidrogênio comprimido a 60 barg foi liberado a através de um trecho de tubo de 1 m de comprimento e de orientação horizontal, com diâmetros internos respectivos de 20,9 e 52,5 mm e localizado a 3,25 m acima do solo. Os detalhes dos limites e das condições ambientais de cada teste são resumidos na Tabela 5.

Flame	d_j [mm]	\dot{m} [kg/s]	p_0 [barg]	T_0 [K]	RH [%]	T_{amb} [K]	p_{amb} [bar]	u_{wind} [m/s]	ϕ_{wind} [°]	L_{vis} [m] (rms)
1	20.9	1.0	59.8	308.7	94.3	280	1.022	2.84	68.5	17.4 (1.1)
2	52.5	7.4	62.1	287.8	94.5	280	1.011	0.83	34.0	45.9 (2.5)

Tabela 5 - Condições de cada uma das duas experiências com chama de jato

As comparações dos resultados do comprimento da chama para a Chama 1 (17,4 m experimentalmente) e a Chama 2 (45,9 m experimentalmente) são apresentadas nas Tabelas 6 e 7 para várias densidades de raios de DTM e modelo de jato expandido usado. Os resultados da simulação se comparam bem aos resultados experimentais com uma variabilidade máxima de 6% a 8%

DTM Rays	Grid	Wind		No Wind	
		Jet Utility	Ewan-Moodie	Jet Utility	Ewan-Moodie
100	100	19.36	18.47	17.94	18.10
	50	18.61	18.14	18.13	17.92
	25	18.43	17.69	18.74	18.01
300	100	19.36	18.47	17.94	18.10
	50	18.61	18.14	18.13	17.92
	25	18.43	17.58	18.66	18.01

Tabela 6 - Comprimento da chama simulado para a Chama 1 (vs Experimental 17,4 m)

DTM Rays	Grid	Wind		No Wind	
		Jet Utility	Ewan-Moodie	Jet Utility	Ewan-Moodie
100	100	43.63	42.88	42.24	43.37
	50	43.10	43.20	42.78	42.13
300	100	43.63	42.88	42.24	43.37
	50	43.03	43.20	43.69	42.13

Tabela 7 - Comprimento da chama simulado para a Chama 2 (vs Experimental 45.9 m)

O campo de radiação ao redor do fogo do jato é determinado a partir do perfil da chama e da temperatura. Portanto, é importante calcular o perfil da chama com uma precisão razoável. O perfil de chama calculado pelo FLACS-Fire (assumindo que a temperatura limite da chama é de 1200 K) para a chama 1 é mostrado na Figura 6. O FLACS Fire prevê bem o formato da chama para incêndios de tamanho médio, embora tenda a superestimar o efeito de flutuabilidade no outro extremo do orifício para incêndios em grande escala



Figura 6 – Comparação de perfis de chama para chama 1

5.2 FOGO DE JATO DE HIDROGÊNIO CRIOGÊNICO

Os experimentos foram conduzidos no Laboratório de Combustão Turbulenta do SNL nos EUA. O principal objetivo dos experimentos foi investigar as características de ignição e chama de incêndios a jato criogênicos subexpansados (Panda) [6] e (Cirrone) [7].

Os cenários analisados de liberações de hidrogênio com temperatura na faixa de 37 a 295 K e pressão de 2-6 bar abs. A temperatura e a pressão de liberação foram mantidas constantes durante cada teste e monitoradas a montante do orifício intercambiável de diâmetro 0,75 mm, 1 mm ou 1,25 mm. O hidrogênio foi liberado verticalmente para cima no laboratório equipado com um sistema de coleta de gases de escape. A geometria e as dimensões da configuração experimental são apresentadas na Figura 7

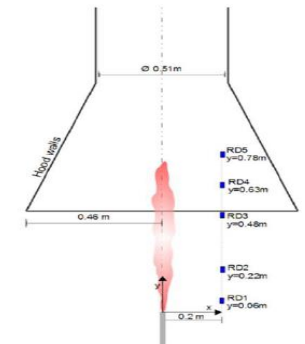


Figura 7 – Configuração experimental de hidrogênio criogênico

Na Figura 8, os fluxos de calor por radiação obtidos do FLACS-Fire foram plotados juntamente com dados experimentais para diferentes pontos de medição e para os diferentes testes. Para todos os casos, os fluxos de calor radiativo calculados pelo FLACS-Fire comparam bem com os dados experimentais

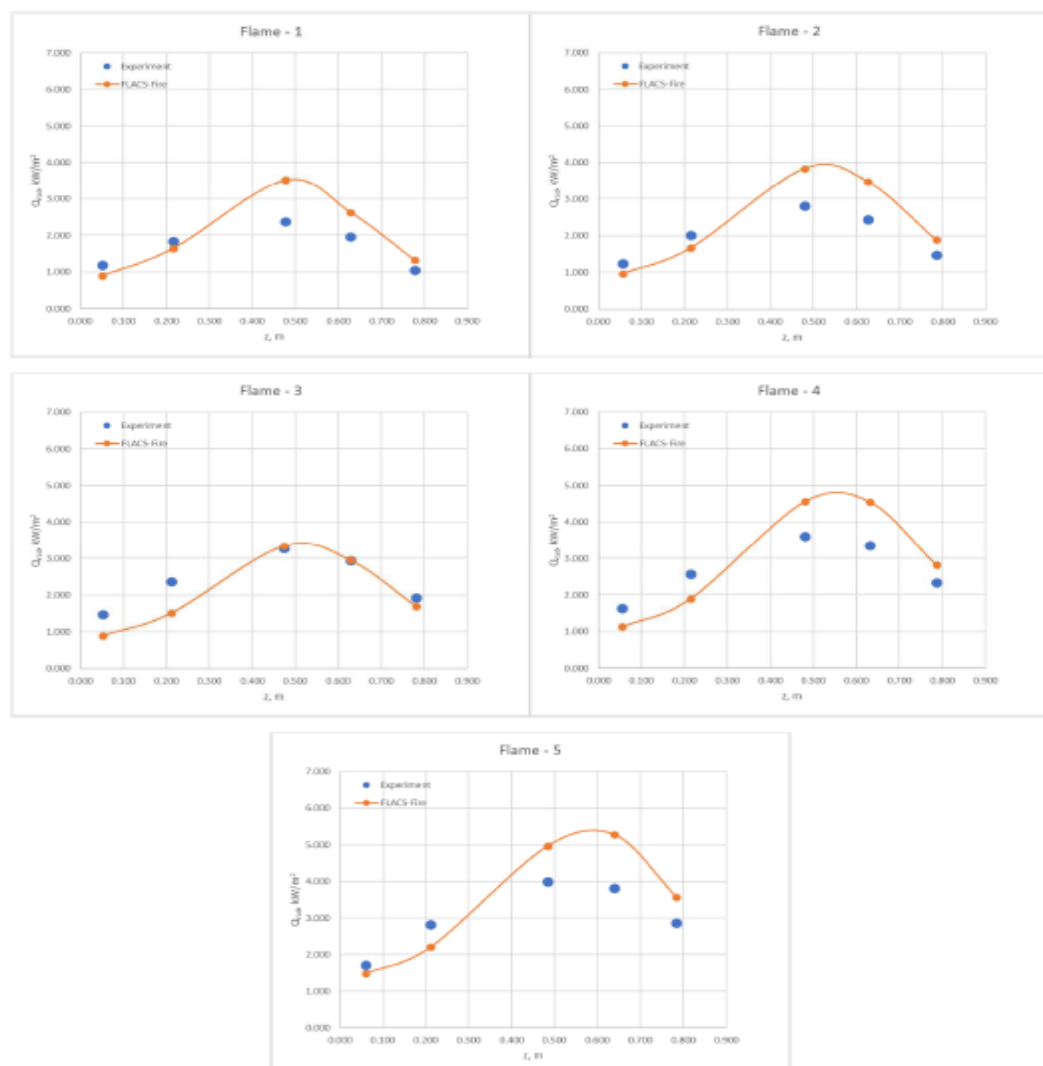


Figura 8 – Validação do fluxo de calor radiativo calculado pela FLACS-Fire para os testes 1-5

A Tabela 8 mostra o comprimento da chama calculado pelo FLACS-Fire usando o modelo Ewan-Moodie. Os resultados da simulação variam de 4% a 20% em comparação com os resultados experimentais.

No Teste	Fluxo de massa [g/s]	Temperatura [K]	Pressão [Bar Abs]	Comprimento da Chama Experimental [m]	Comprimento da Chama Simulado (Ewan-Moodie) [m]
1	0.33	64	2	0.66	0.7
2	0.38	48	2	0.70	0.8
3	0.45	75	3	0.72	0.75
4	0.56	78	4	0.74	0.85
5	0.64	82	5	0.78	0.85

Tabela 8 - Validação de 5 testes de para o comprimento de chama calculado pelo FLACS-Fire

5.3 FOGO HORIZONTAL DE JATO DE HIDROGÊNIO

Os resultados do FLACS-Fire foram comparados com dados experimentais de incêndios com jatos de hidrogênio horizontais da INERIS relatados por Studer [8]. Todos os testes foram realizados em uma galeria adequada para controlar as condições ambientais sem vento e com temperatura constante e também para limitar qualquer efeito que possa surgir de uma explosão imprevista. A Figura 10 mostra o fluxo de chamas e calor ao redor da chama em comparação com uma fotografia experimental

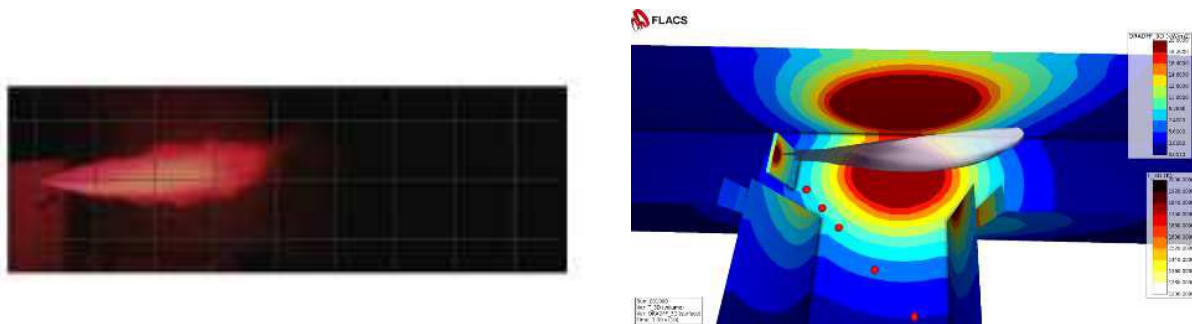


Figura 10 – Perfil da chama experimental vs FLACS-Fire incluindo o fluxo radiativo

Os fluxos de calor a 1, 5, 20 s são comparados com os dados experimentais na Figura 11. Geralmente, os fluxos de calor radiativos calculados pelo FLACS-Fire se comparam muito bem com os dados experimentais

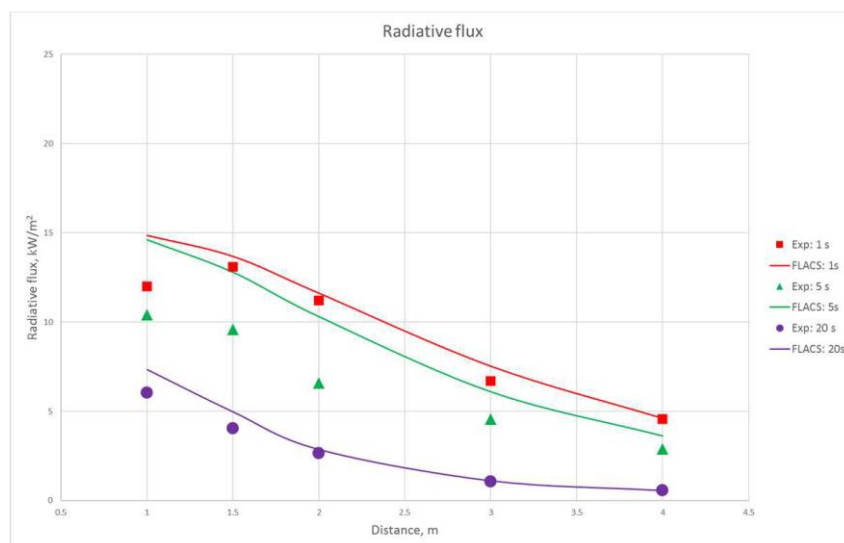


Figura 11 – Comparação do fluxo de calor simulado e medido a partir do experimento em diferentes instantes durante o vazamento

5.4 EXPERIMENTO DE LIBERAÇÃO DE GRANDE ESCALA DA SRI

O experimento de liberação de grande escala foi projetado para estudar a liberação e ignição de grandes quantidades de hidrogênio que podem resultar duma falha catastrófica de um recipiente de armazenamento (Groethe) [9]. O hidrogênio foi armazenado em dois vasos com um volume de água de cerca de 16,2 m³ a uma pressão de 2,4 MPa. O gás hidrogênio foi liberado através de um bico crítico de garganta toroidal verticalmente orientado, com um diâmetro de 42 mm. Os transdutores de pressão foram instalados no campo livre junto com um sensor de fluxo de calor. Vídeos infravermelhos e de alta velocidade foram usados para documentar o jato de chama. A liberação ocorreu com vento fraco (5,4 m / s) e condições de umidade relativa muito alta (91%). A ignição espontânea ocorreu cerca de 360 ms após o início da liberação, conforme mostrado pelos quadros de vídeo de alta velocidade (veja a Figura 12).

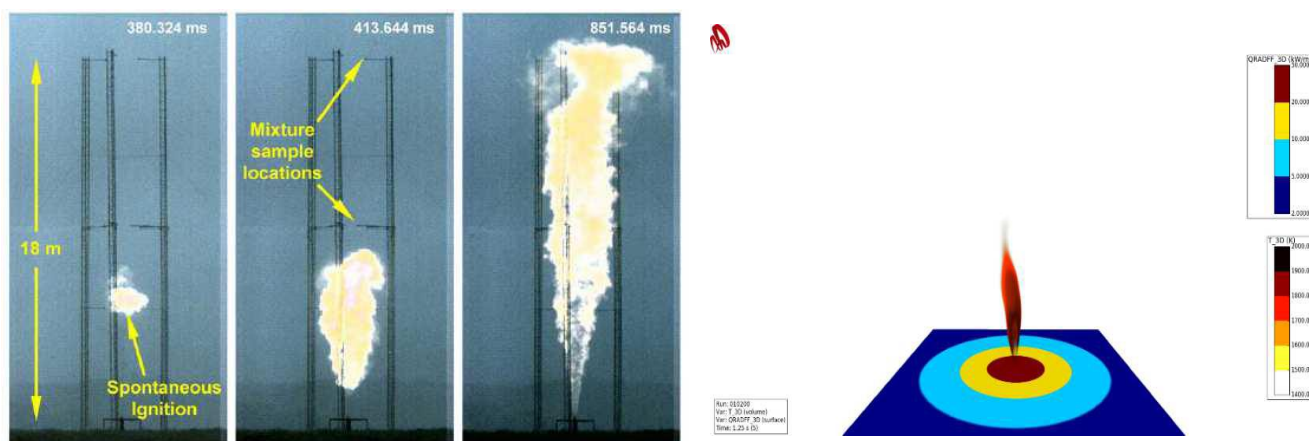


Figura 12 – Quadros de vídeo de alta velocidade do experimento de liberação a grande escala e temperatura de chama e fluxo radiativo computados pelo FLACS-Fire ao redor do bico

Na Figura 13, os fluxos de calor radiativos transitórios obtidos do FLACS-Fire foram plotados juntamente com dados experimentais medidos a 5 m do local do vazamento. Para todos os casos, o fluxo de calor radiativo calculado pelo FLACS-Fire compara bem com os dados experimentais.

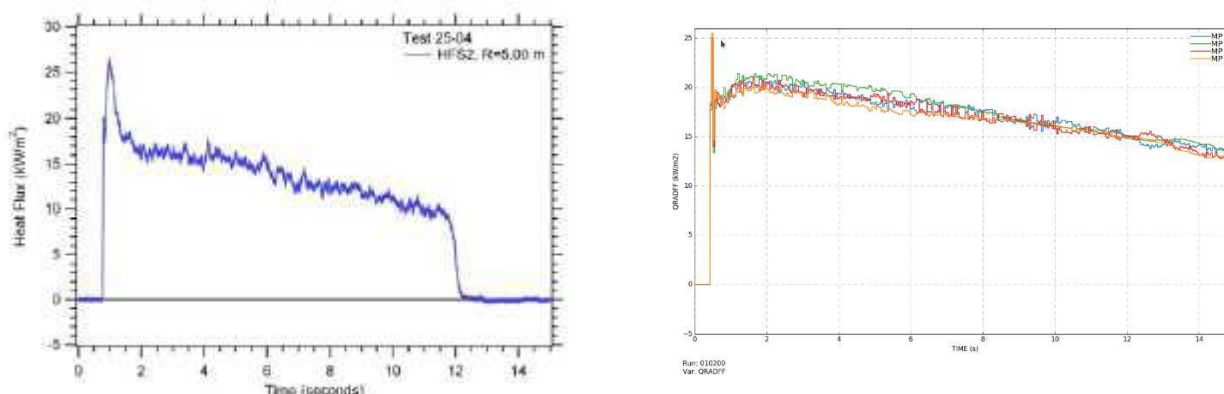


Figura 13 – Comparação do fluxo de calor a 5 m do local do vazamento do experimento e a simulação

6 RESUMO E CONCLUSÕES

Tanto os órgãos governamentais quanto a indústria mostram uma crescente conscientização da necessidade de qualificar modelos de consequência para aplicações específicas, por exemplo, exigindo que os modeladores demonstrem as capacidades de seu modelo na reprodução de resultados de determinadas experiências. A constituição de uma matriz de validação para modelagem de consequências de incêndios gasosos com hidrogênio tem sido uma das brechas de conhecimento. Portanto, é essencial concluir a estrutura de validação integrada para o FLACS-Fire envolvendo incêndios por jato de hidrogênio gasoso e preencher o sistema com casos de validação relevantes que abrangem toda a gama de aplicações. Um banco de dados é essencial para organizar o conhecimento relacionado à validação. Neste artigo, casos típicos do banco de dados de validação para incêndio de jato de hidrogênio gasoso foram apresentados. O banco de dados resultante é muito valioso para teste e validação de software, otimização de parâmetros, estimativa de incertezas nos resultados da simulação, treinamento e documentação

7 REFERÊNCIAS

- [1] MEGGE (1996). Gas explosion model evaluation protocol – Version 1. Model Evaluation Group Gas Explosions (MEGGE): 32 pp.
- [2] Hanna, S.R., Strimaitis, D.G. & Chang, J.C. (1991a). Hazard response modelling uncertainty (a quantitative method) – Vol. I: User's guide for software for evaluating hazardous gas dispersion models. Sigma Research Corporation, Westford, USA.
- [3] Hanna, S.R., Strimaitis, D.G. & Chang, J.C. (1991b). Hazard response modelling uncertainty (a quantitative method) – Vol. II: Evaluation of commonly-used hazardous gas dispersion models. Sigma Research Corporation, Westford, USA.
- [4] Hanna, S.R., Chang, J.C. & Strimaitis, D.G. (1993). Hazardous model evaluation with field observations. *Atmospheric Environment*, 27A: 2265–2285.
- [5] I.W. Ekoto, A.J. Ruggles, L.W. Creitz, J.X. Li, Updated jet flame radiation modeling with buoyancy corrections, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 39, Issue 35, 3 December 2014, Pages 20570-20577.
- [6] P. P. Panda, Private communication, Sandia National Laboratories, 2016.
- [7] D.M.C. Cirrone, D. Makarov, V. Molkov, Thermal radiation from cryogenic hydrogen jet fires, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 44, Issue 17, 2 April 2019, Pages 8874-8885.
- [8] Studer, E., Jamois, D., Jallais, S., Leroy, G., Hebrard, J., Blanchetière, V., Properties of large-scale methane/hydrogen jet fires, *Int. J. Hydrogen Energy*, 34, (2009), 9611-9619.
- [9] Groethe, M., Merilo, E., Colton, J., Chiba, S., Sato, Y., Iwabuchi, H., “Large-scale hydrogen deflagration and detonation”, *International Journal of Hydrogen Energy* v.32, 2007, pp. 2125 – 2133.