

SIMULAÇÃO DE INCÊNDIOS EM AMBIENTES PETROLÍFEROS COM EMPREGO DE MODELOS NUMÉRICOS EM DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Julio C. G. Silva^a, Alexandre Landesmann^b e Fernando B. Ribeiro^c

*Universidade Federal do Rio de Janeiro, Laboratório de Estruturas e Materiais - COPPE/UFRJ,
Rio de Janeiro, Brasil*

emails: ^{a,b,c}{jcsilva, alandes, fernando} @coc.ufrj.br

Palavras-chave: Incêndio, Dinâmica de Fluidos Computacional, Estruturas Offshore.

Resumo. O presente artigo tem como objetivo a simulação numérico-computacional de incêndios em ambientes petrolíferos, via Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Para tanto, será utilizado o programa *Fire Dynamics Simulator (FDS)*, desenvolvido no *National Institute of Standards and Technology (NIST – EUA)*. A carga térmica é simulada de duas formas: os modelos de *poolfire* e de *jetfire*, o primeiro considera o combustível espalhado em uma poça sobre uma superfície qualquer, já no segundo o incêndio é fruto de um vazamento de gás em forma de jato. As características de cada modelo influenciam significativamente o desenvolvimento do incêndio. A possibilidade de simular diferentes combustíveis permite a proposição de modelos mais realísticos, levando em consideração os principais aspectos de cada cenário. Um inconveniente encontrado para este tipo de simulação é o tempo envolvido no processamento destas análises. O processamento em paralelo é empregado como forma de suprir esta demanda. Para avaliar a resposta numérica são apresentadas aplicações, com ambos os modelos citados, os resultados obtidos são ainda confrontados com curva analítica simplificada prevista pelo código normativo relacionado, permitindo-se inferir sobre a aplicabilidade das mesmas. Entende-se que o emprego de técnicas avançadas para simulação de incêndios, como o modelo tratado neste artigo, pode ser incorporado à prática de projeto de estruturas sob fogo, permitindo-se o desenvolvimento de análises refinadas com manutenção dos níveis de segurança e economia de sistemas de proteção.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, modelos baseados no Método dos Elementos Finitos (*Finite Element Method - FEM*) são capazes de simular o comportamento de estruturas em situação de incêndio. Através da consideração do desempenho global da estrutura, dos efeitos de segunda ordem e de diferentes materiais, tais modelos permitem um cálculo mais avançado da sobrevivência de estruturas submetidas ao fogo. Nestes casos, o incêndio é simulado com a utilização de curvas nominais, como as presentes no item 3.2 do *Eurocode 1* (EC1) p1.2 (CEN, 2002), todavia, estas curvas não representam incêndios reais. Por outro lado, modelos baseados na Dinâmica de Fluidos Computacional (*Computational Fluid Dynamics - CFD*) são capazes de considerar efeitos da combustão, da concentração de fumaça e a evolução do campo de temperaturas. As características físicas dos fluidos são geralmente descritas considerando equações fundamentais, na forma de equações diferenciais parciais, que governam o problema de interesse. Para resolver estas equações, opta-se pela forma discreta. Alguns trabalhos têm avançado na modelagem em CFD com diversas ferramentas numéricas, como por exemplo, o programa *Fire Dynamics Simulator* (FDS) (McGrattan *et al.*, 2010a) desenvolvido pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST – EUA). Resultados obtidos através de simulações numéricas com o FDS foram comparados com dados experimentais como: Gutierrez-Montes *et al.* (2009) e Chow *et al.* (2009), com ênfase no movimento de fumaça e outros gases, apresentando boa correlação. Outros trabalhos buscaram, através desta ferramenta, reconstruir incêndios reais, para auxiliar investigações sobre causas do sinistro, citando-se: Shen *et al.* (2008), que permitiram uma melhor compreensão do desenvolvimento do incêndio.

Neste contexto, o principal objetivo do presente trabalho, em fase de desenvolvimento, é simular condições de incêndio em ambientes petrolíferos através de modelo numérico baseado em CFD. Para tanto, com o auxílio do programa FDS, serão analisados dois focos de incêndio possíveis: (i) considerando como combustível uma quantidade de óleo (petróleo) espalhado em uma poça sobre certa superfície, caracterizando o modelo de *poolfire*; (ii) fruto de um vazamento de gás (propano), no qual o incêndio se desenvolve a partir de um jato, liberado devido a uma falha em um recipiente pressurizado, se desenvolvendo conforme um *jetfire*. O vazamento de gás é prescrito através de uma função dependente do tempo, desta forma, a variação de pressão dentro da tubulação pode ser computada.

Os resultados obtidos pelo modelo computacional são analisados e comparados com a curva de hidrocarbonetos presente no item 3.2.3 do EC1p1.2 (CEN, 2002). Ambos os cenários consideram a mesma geometria, um domínio aberto, bem ventilado, e com altura compatível com um convés de plataforma, sendo assim, busca-se um cenário próximo a um grande compartimento, como por exemplo, a sala das máquinas. A distribuição espacial tridimensional do campo de temperaturas nos cenários de acidente é de grande importância para as análises do comportamento estrutural e de segurança nestas instalações.

As principais características do modelo numérico utilizado pelo FDS, assim como as equações fundamentais de conservação são descritas no item 2. Os cenários dos acidentes considerados para as aplicações e as principais propriedades térmicas dos combustíveis são apresentados no item 3, juntamente com um estudo sobre o desempenho da computação em paralelo utilizada para o processamento das simulações. São apresentados resultados da eficiência computacional (*SpeedUp*) em função do número de processadores. Os resultados obtidos para a energia liberada, a temperatura máxima alcançada e o comportamento da chama em função do tempo de desenvolvimento do incêndio também seguem no item 3, onde ainda é possível observar a comparação da distribuição tridimensional do campo de temperaturas com a curva da hidrocarbonetos.

2 DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

O FDS é um modelo baseado em CFD direcionado a situações de incêndio, sendo capaz de analisar o comportamento dos fluidos. A descrição apresentada a seguir é adaptada de McGrattan *et al.* (2010a e 2010b) O modelo soluciona numericamente as equações de *Navier-Stokes* em uma forma apropriada para baixa velocidade e voltada ao transporte de calor, com ênfase na dissipação da fumaça. As derivadas parciais das equações de conservação da massa, movimento e energia são aproximadas utilizando diferenças finitas, a solução é atualizada no tempo em uma malha ortogonal e tridimensional. Desta forma, a geometria dos compartimentos, aberturas, e outros elementos se adaptam para se encaixar nesta malha. Partículas Lagrangeanas são utilizadas para simular o comportamento da fumaça.

O algoritmo central do modelo hidrodinâmico é um preditor-corretor explícito de precisão de segunda ordem no tempo e no espaço. Neste tipo de algoritmo o primeiro passo (preditor) calcula uma aproximação da quantidade desejada, e um segundo passo (corretor) refina a aproximação inicial para calcular a variável em questão. A turbulência é tratada através da forma *Smagorinsky* para *Large Eddy Simulation* (LES). Também é possível utilizar simulação numérica direta (*Direct Numerical Simulation* - DNS), para tanto a malha deverá ser adequadamente refinada.

O FDS utiliza um modelo de combustão baseado no conceito *mixture fraction*. A reação entre combustível e oxigênio não é necessariamente instantânea ou completa. A radiação térmica é incluída no modelo através da solução da equação de transporte da radiação, resolvida através de uma técnica similar ao método de volumes finitos empregado para o transporte convectivo, com aproximadamente 100 ângulos discretos.

2.1 Equações fundamentais de conservação

As equações de *Navier-Stokes* são simplificadas considerando o baixo número de *Mach* das aplicações. Estas equações seguem abaixo (Eq. (1) à (4)), as diversas aproximações empregadas podem ser obtidas em Anderson *et al.* (1984).

Conservação de Massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m} \quad (1)$$

Conservação do Movimento

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla p = \rho \mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} \quad (2)$$

Conservação da Energia (entalpia)

$$\frac{\partial(\rho h_s)}{\partial t} + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q} - \nabla \cdot \boldsymbol{\epsilon} \quad (3)$$

Equação de estado para o gás ideal

$$p = \frac{\rho RT}{\bar{W}} \quad (4)$$

onde ρ é a densidade, \mathbf{u} é o vetor velocidade, \dot{m} é a taxa de produção de massa, p é a pressão, \mathbf{g} é o vetor gravidade, \mathbf{f}_b é o vetor de forças externas (excluindo gravidade), $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ é o tensor de tensão viscosa, h_s é a entalpia (função da temperatura), \dot{q} é a taxa de liberação de calor (*Heat Release Rate – HRR*) por unidade de volume, $\boldsymbol{\epsilon}$ é o vetor fluxo de calor, ϵ é a taxa de dissipação, R é a constante universal dos gases, T é a temperatura e \bar{W} é a massa molecular. Pode-se notar que este conjunto de equações diferenciais parciais consiste em seis equações (a equação da conservação do movimento divide-se em 3, nos eixos x , y e z , por se tratar de uma análise tridimensional) e seis incógnitas todas em função do tempo e do espaço.

3 APLICAÇÃO

O modelo numérico descrito anteriormente é aplicado para simular situações de incêndio em ambientes petrolíferos. São considerados dois focos de incêndio: (i) modelo *poolfire*, comum em áreas como parques de tancagem, vasos, tubulações e equipamentos que manuseiam líquidos como óleos combustíveis, minerais, petróleo, gasolina, etc., normalmente apresenta-se acima de uma superfície, onde previamente se depositou combustível; (ii) modelo *jetfire*, gerado através do vazamento de gás oriundo de um equipamento pressurizado, como vasos, tubulações, trechos entre válvulas, etc., onde a pressão interna seja maior que a pressão atmosférica. A mesma geometria será considerada em ambos os casos e segue caracterizada na Figura 1. Também é possível observar a localização dos pontos escolhidos para exposição dos resultados. A altura total da geometria escolhida é compatível com um deck de uma plataforma *offshore*. As condições de ventilação do modelo são escolhidas para simular um subdomínio de um amplo compartimento, como a área das máquinas, desta forma o contorno é considerado aberto, permitindo a troca de gases com a região ao redor da simulação. O principal objetivo destas aplicações é comparar os resultados obtidos pelo modelo CFD com a curva de hidrocarbonetos presente no

EC1p1.2 (CEN, 2002) e avaliar a importância da distribuição espacial do campo de temperaturas.

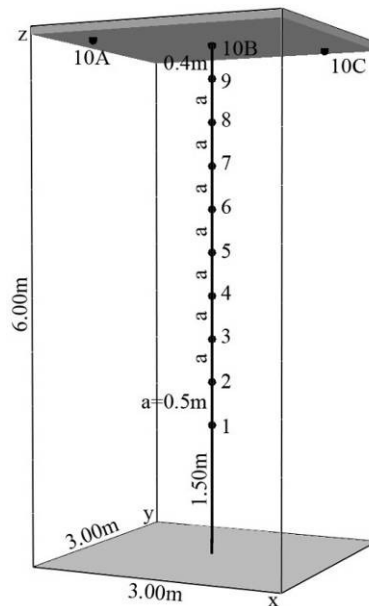


Figura 1: Caracterização da geometria do domínio e localização dos pontos para exposição dos resultados.

3.1 Processamento em Paralelo

Modelos baseados em CFD têm se tornado cada vez mais populares nos últimos anos, todavia os elevados custos computacionais, necessários para desenvolver simulações confiáveis, se apresentam como um desafio. Desta forma, a computação em paralelo possui potencial para suprir esta demanda com um custo razoável. Neste trabalho, o desempenho da implementação paralela do modelo foi testado em um Cluster, onde foram utilizados até 20 nós. Cada nó é composto por um Core2duo 2.66GHz 1333MHz com 8GB de RAM com uma rede homogênea de 1Gbps. O modelo de *Message Passing Interface* (MPI) é utilizado para a comunicação entre os nós. Internamente, os nós são capazes de aproveitar sua arquitetura *multicore* para dividir a tarefa em *threads* através do *OpenMP*. Para avaliar o desempenho desta aplicação, o modelo de *poolfire* foi dividido e testado para 2, 10 e 20 nós, os resultados de *SpeedUp* seguem na Figura 2. O *SpeedUp* ($S_p = t_1 / t_n$) é a relação entre o tempo gasto para o processamento com uso de um único nó e o tempo gasto com o processamento em paralelo.

O *SpeedUp* ideal ($S_p = n$), ou seja, sem perdas de comunicação é plotado para comparação com o calculado através do processamento do modelo. Através dos resultados nota-se que para um número cada vez maior de nós, há uma maior diferença entre o *SpeedUp* ideal e o linear, isto se deve ao tempo gasto para comunicação entre os nós e a organização dos resultados a cada passo de tempo. Com apenas 2 nós, o processamento de 600s de simulação necessita de

aproximadamente 406hrs (quase 17 dias), com 10 nós este tempo cai para 103hrs representando apenas 25% do tempo gasto anteriormente, já para os 20 nós a simulação é finalizada em 66hrs, significando 16% do tempo necessário para 2 nós.

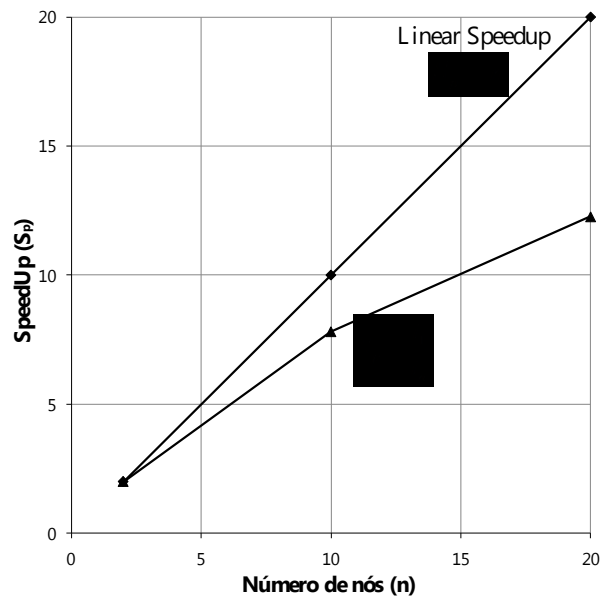


Figura 2: Eficiência computacional do processamento em paralelo através do SpeedUp.

3.2 Poolfire

A origem do incêndio considerada nesta etapa do trabalho é definida como 210 litros de óleo (petróleo), acomodados em 1m² na região central da base do modelo. Este modelo representa um incêndio ocorrido devido ao derramamento de óleo com posterior ignição.

As propriedades do óleo foram obtidas de acordo com a literatura disponível, o calor específico e a condutividade térmica são considerados como dependentes da temperatura. De acordo com Speight (2001) o calor específico varia de 0.397 a 0.613 [kJ/(kg.K)], a densidade é considerada 855.6 [kg/m³] e o calor necessário para a reação de combustão 338.9 [kJ/kg]; já a condutividade térmica é considerada conforme descrito em Baltatu *et al.* (1985) variando entre 0.115 a 0.089 [W/(m.K)].

Na Figura 3, pode-se observar a variação da temperatura em diversos pontos do domínio em função do tempo de desenvolvimento do incêndio. Na fase inicial do incêndio, o ponto mais próximo a chama, *poolfire* 1 (P1) possui a temperatura mais elevada, porém com o desenvolvimento do incêndio e com o aumento da chama, a temperatura neste ponto diminui, devido ao forte empuxo que traz os gases frios para o interior da chama, esta dinâmica já era esperada de acordo com a descrição do movimento de pluma das chamas (NFPA, 2002). Para pontos mais elevados, como P4 e P8, o movimento é inverso, com o aumento das temperaturas. Nos pontos mais distantes do foco do incêndio, a intermitência da chama causa uma grande variabilidade na temperatura, como os pontos P8 e P10b, dados respectivamente nas Figura 3b e 3c.

Comparando os resultados obtidos com a curva de hidrocarbonetos (CH), cuja

expressão pode ser observada na Eq.(5), presente no EC1p1.2 (CEN, 2002) é possível perceber que apenas os pontos mais próximos a chama apresentam temperaturas superiores e somente durante a fase inicial do incêndio;

$$\theta_g = 1080(1 - 0.325e^{-0.167t} - 0.675e^{-2.5t}) + 20 \quad (5)$$

onde θ_g [°C] é a temperatura do gás, e t [min] é o tempo de desenvolvimento do incêndio.

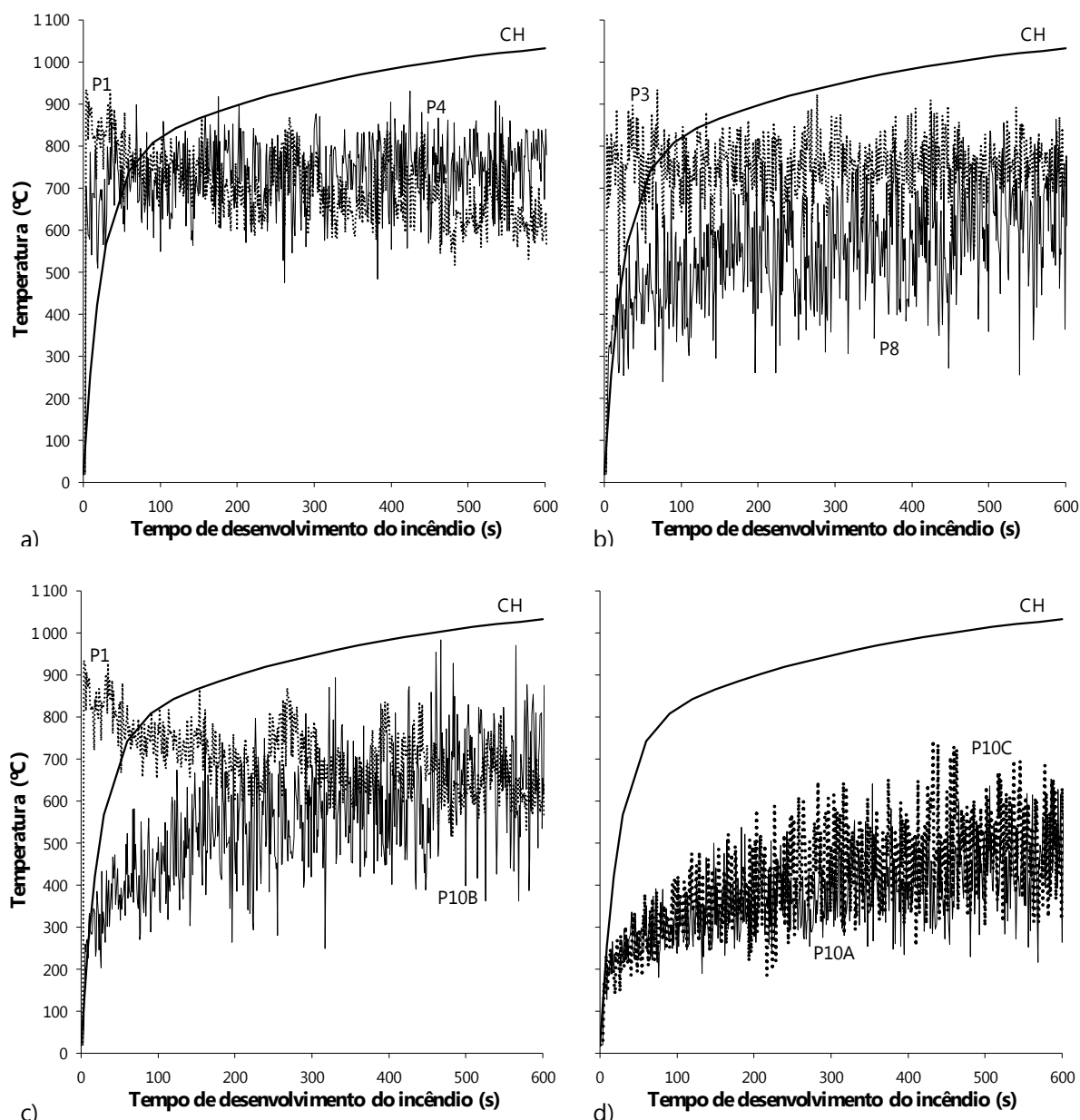


Figura 3: Resultados de temperatura em função do tempo de desenvolvimento do incêndio para o modelo de *poolfire* nos pontos: a) P1 e P4; b) P3 e P8; c) P1 e P10B; d) P10C e P10A.

Os pontos situados no teto do compartimento, P10A, B e C, apresentam temperaturas da ordem de metade da CH, o que se deve ao grande espalhamento promovido pelas aberturas laterais, fazendo com que os gases quentes fluam

rapidamente pelas aberturas.

A taxa de liberação de calor (*Heat Release Rate – HRR*) é essencial para a análise de incêndios. Tal variável descreve quantitativamente o “tamanho” do incêndio, representa a energia liberada pela combustão [kW] e varia em função do tempo. A variação do HRR em função do tempo de desenvolvimento do incêndio pode ser visualizada na Figura 4, o perfil gerado pela curva e o grande crescimento na fase inicial estão de acordo com os resultados obtidos para as temperaturas.

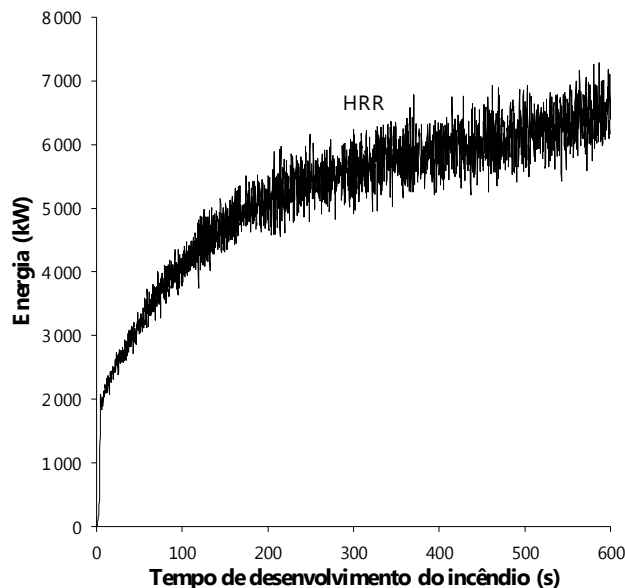
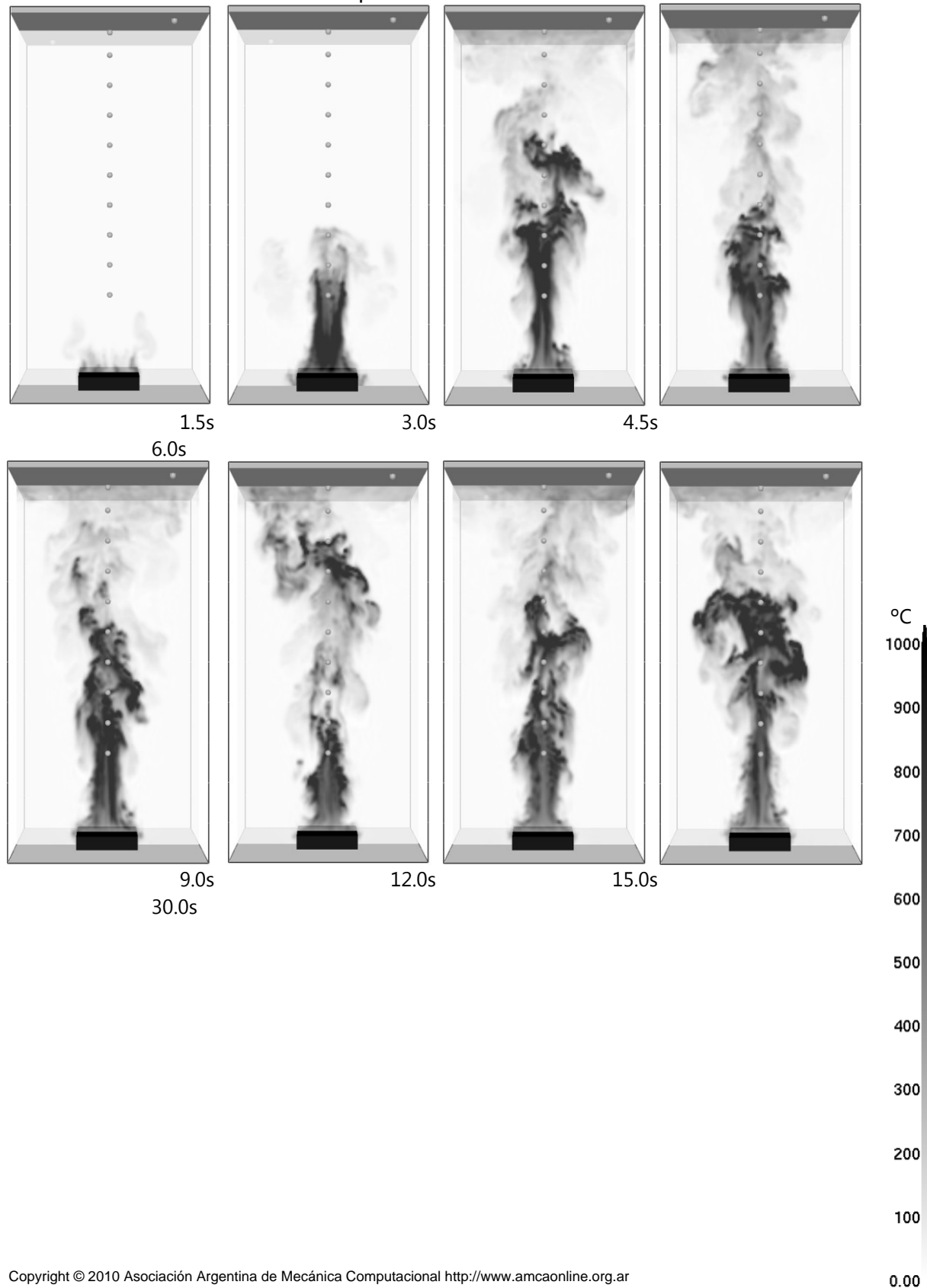


Figura 4: Resultado da liberação de calor (energia) em função do tempo de desenvolvimento do incêndio para o modelo de *poolfire*.

A distribuição de temperaturas no plano xz ($y=1.5\text{m}$) do domínio segue na Figura 5, onde é possível observar o rápido crescimento deste tipo de incêndio, o que se deve ao alto poder de combustão do óleo. A partir dos 4.5s identifica-se uma redução da temperatura nos pontos próximos a chama devido ao forte empuxo causado pelo movimento da pluma. Este fenômeno se acentua com o desenvolvimento do incêndio, com o aumento da chama e da velocidade dos fluidos, fazendo com que os pontos que apresentam as maiores temperaturas se distanciem do combustível. Através desta distribuição bidimensional (Figura 5), observa-se outra característica muito importante do comportamento dos fluidos: os gases quentes se movem em direção ao teto e se espalham rapidamente; o que faz com que a temperatura ao redor da chama se mantenha baixa ($<100^{\circ}\text{C}$ para todos os instantes). Desta forma, a distribuição espacial da temperatura torna-se um fator ainda mais importante neste cenário, tal distribuição não é levada em consideração nas curvas nominais de incêndio presentes no EC1p1.2, como por exemplo, a curva de hidrocarbonetos presente na Figura 3.

Na Figura 6 seguem expostos: (i) a evolução da chama visível (energia superior à 200kW/m^3) e (ii) a distribuição da fumaça. Na fase inicial do incêndio (aos 4.5s) as chamas atingem os 4m de altura, todavia neste instante o diâmetro da chama ainda é

reduzido. A partir deste ponto, há uma expansão no diâmetro da chama, ocasionando o aumento da velocidade dos fluidos na região próxima à origem da chama (pluma). Este desenvolvimento leva ao aumento da altura da chama, que a partir dos 60s de incêndio atinge os 5m. Em seguida, aos 180s podemos identificar que a chama chega ao teto. Aos 300s, o diâmetro da chama corresponde à área do combustível.



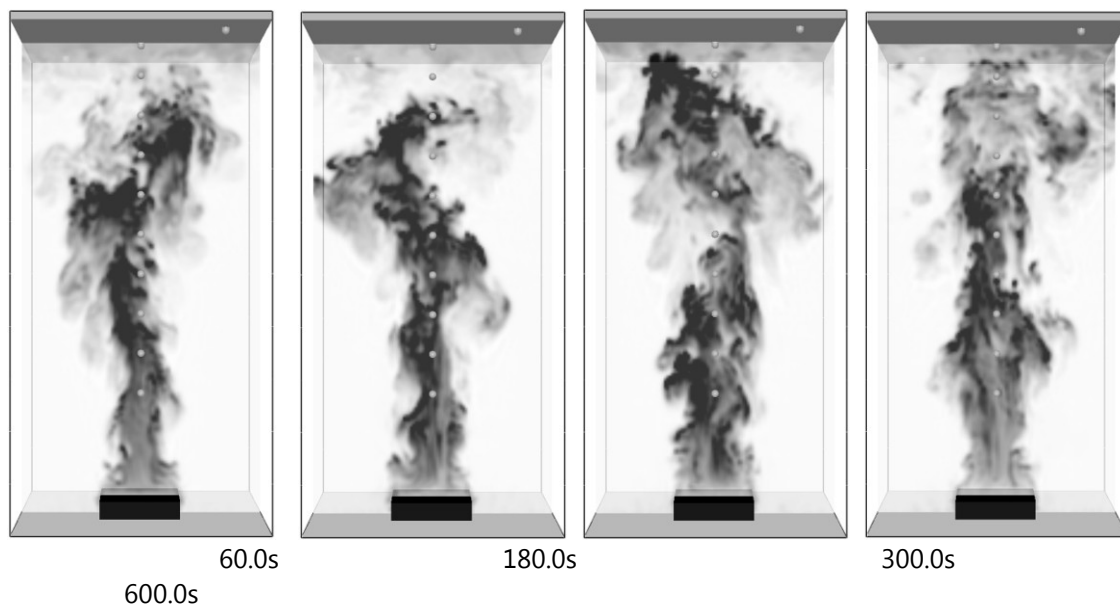


Figura 5: Distribuição de temperaturas no plano xz ($y=1.5\text{m}$) para o modelo de *poolfire* em diferentes instantes de tempo.

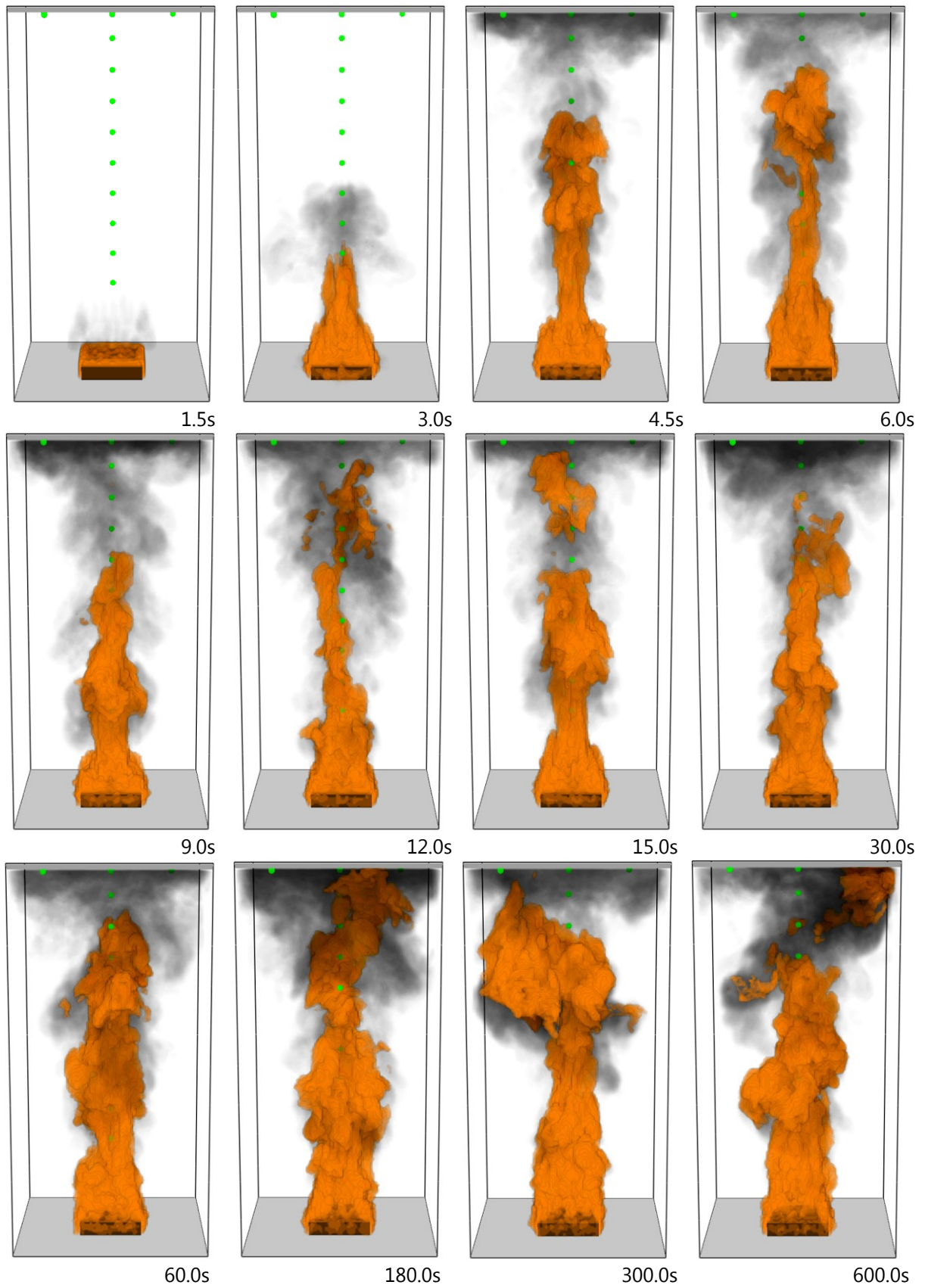


Figura 6: Evolução da chama visível e da fumaça para o modelo de *poolfire* em função do tempo.

Vale ressaltar que uma grande intermitência na chama, provoca uma variação no campo de temperaturas, como visto na Figura 3. As condições de ventilação são de grande importância para o comportamento observado, além do crescimento do incêndio estar relacionado com a quantidade de oxigênio, o rápido espalhamento da fumaça também contribui para o aumento das velocidades e da altura da chama.

3.3 Jetfire

Nesta etapa do trabalho o incêndio será considerado como oriundo de um vazamento de gás em uma tubulação. O gás inflamável presente nesta tubulação é o propano (C_3H_8). Para simular o comportamento de um vazamento, o propano será inflado no compartimento através de um orifício de 9cm^2 (correspondente a um quadrado de lado 3cm). Apesar de existirem dispositivos de segurança nestas tubulações, como por exemplo, válvulas que cortam a alimentação de gás em caso de acidente, os mesmos são capazes apenas de minimizar o volume de gás que é liberado. Considerando este quadro, é simulada uma variação na velocidade em que o propano é inflado no compartimento, oriundo da redução da pressão na tubulação, que pode ser visto na Figura 7, onde se observa também a concordância entre esta vazão prescrita e a simulada pelo modelo CFD. Para esta simulação espera-se que o gás pare de fluir pela tubulação em aproximadamente 550s.

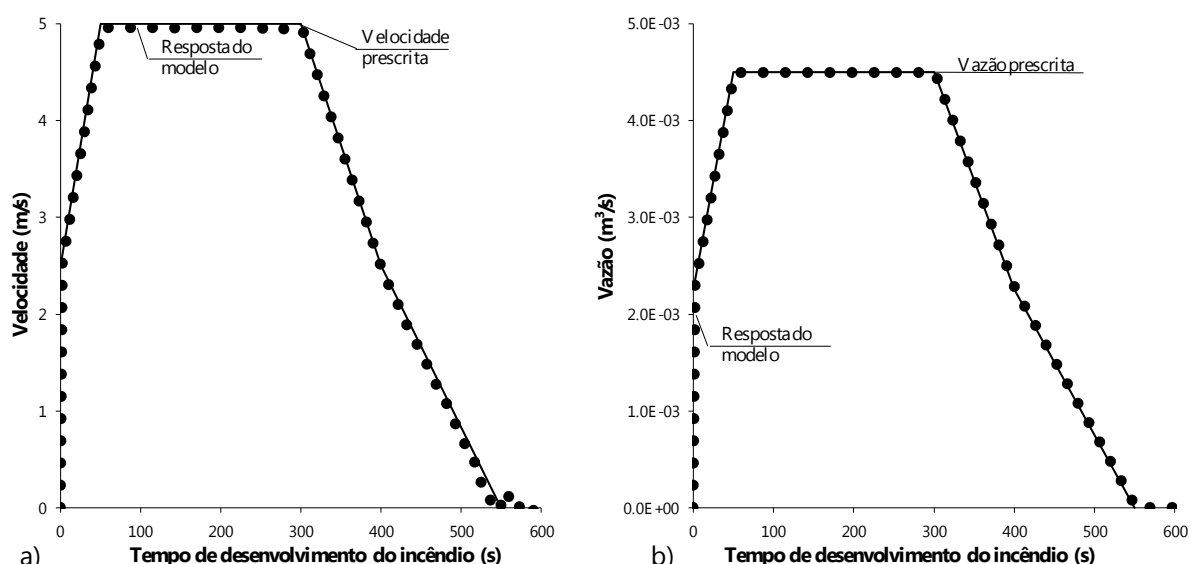


Figura 7: Vazamento de gás considerado no foco de incêndio: a) velocidade; b) vazão.

Os resultados de temperatura em função do tempo de desenvolvimento do incêndio seguem na Figura 8. Para os pontos P1, P2 e P4 os resultados de temperatura não apresentam grandes variações, visto que estes pontos estão próximos da chama. Os pontos P6 e P8 já apresentam temperaturas muito baixas em relação aos demais, chegando a aproximadamente 300°C para o P6 e 180°C para o

P8. Em comparação com a curva de hidrocarbonetos (CH), pode-se perceber uma grande diferença, os pontos mais próximos a chama apresentam na fase inicial resultados de temperatura superiores a CH, todavia por um breve instante.

Os pontos situados no teto do compartimento são pouco afetados por este foco de incêndio, atingindo uma temperatura máxima menor que 150°C no ponto P10B, para os pontos P10A e P10C esta temperatura é aproximadamente 90°C . A Figura 9 traz a taxa de liberação de calor (HRR), entre 50s e 300s esta energia é aproximadamente 415kW, compatível com a entrada de combustível no compartimento. Comparando com a liberação de energia para o modelo *poolfire* pode-se quantificar esta diferença, para o primeiro cenário, a energia máxima está em torno de 7000kW.

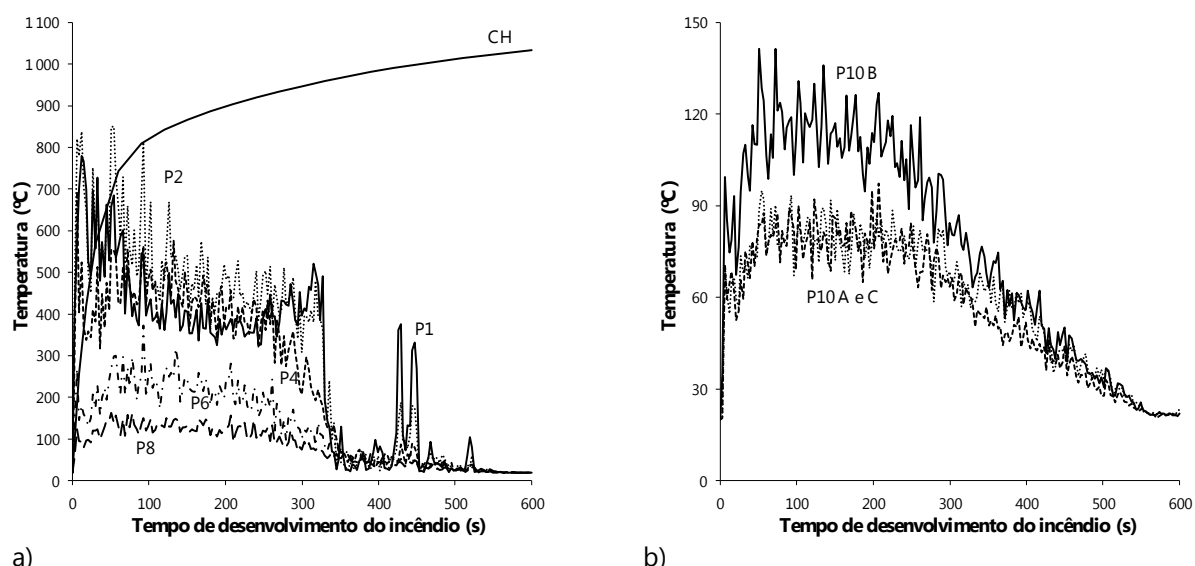


Figura 8: Resultados de temperatura em função do tempo de desenvolvimento do incêndio para o modelo de *jetfire*: a) Pontos J1, J2, J4, J6 e J8; b) Pontos J10A, J10B e J10C.

A Figura 10 traz a distribuição das temperaturas em um plano xz ($y=1.5\text{m}$), através destas imagens pode-se visualizar que os pontos fora do eixo da chama apresentam temperaturas próximas da temperatura ambiente, ou seja, as altas temperaturas provocadas pela ação do incêndio são apenas verificadas acima da origem do vazamento. Os gases se espalham rapidamente devido as condições de contorno e a velocidade alcançada. A altura da chama visível está exposta juntamente com a fumaça na Figura 11, a média obtida por este cenário é de aproximadamente 3.5m, chegando a 4m durante a fase de maior liberação de calor (50s a 300s). Observa-se a compatibilidade entre esta altura e a liberação de calor em todas as fases da simulação, apresentando até a fase equivalente ao arrefecimento após os 300s. O diâmetro da chama não apresenta alterações significativas durante a simulação. O comportamento dos fluidos fica condicionado à liberação de calor (compatível com a função do vazamento de gás).

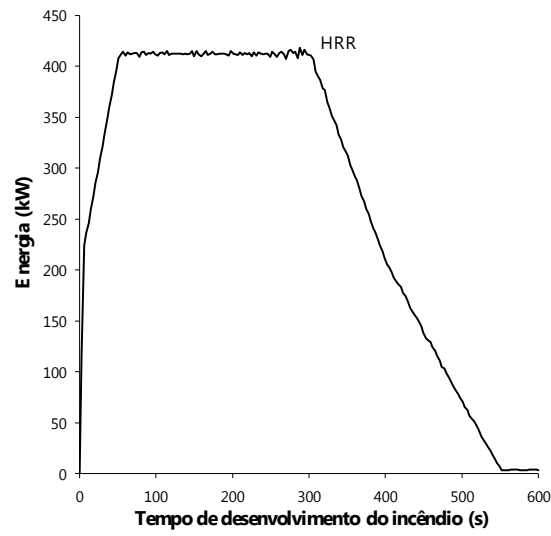
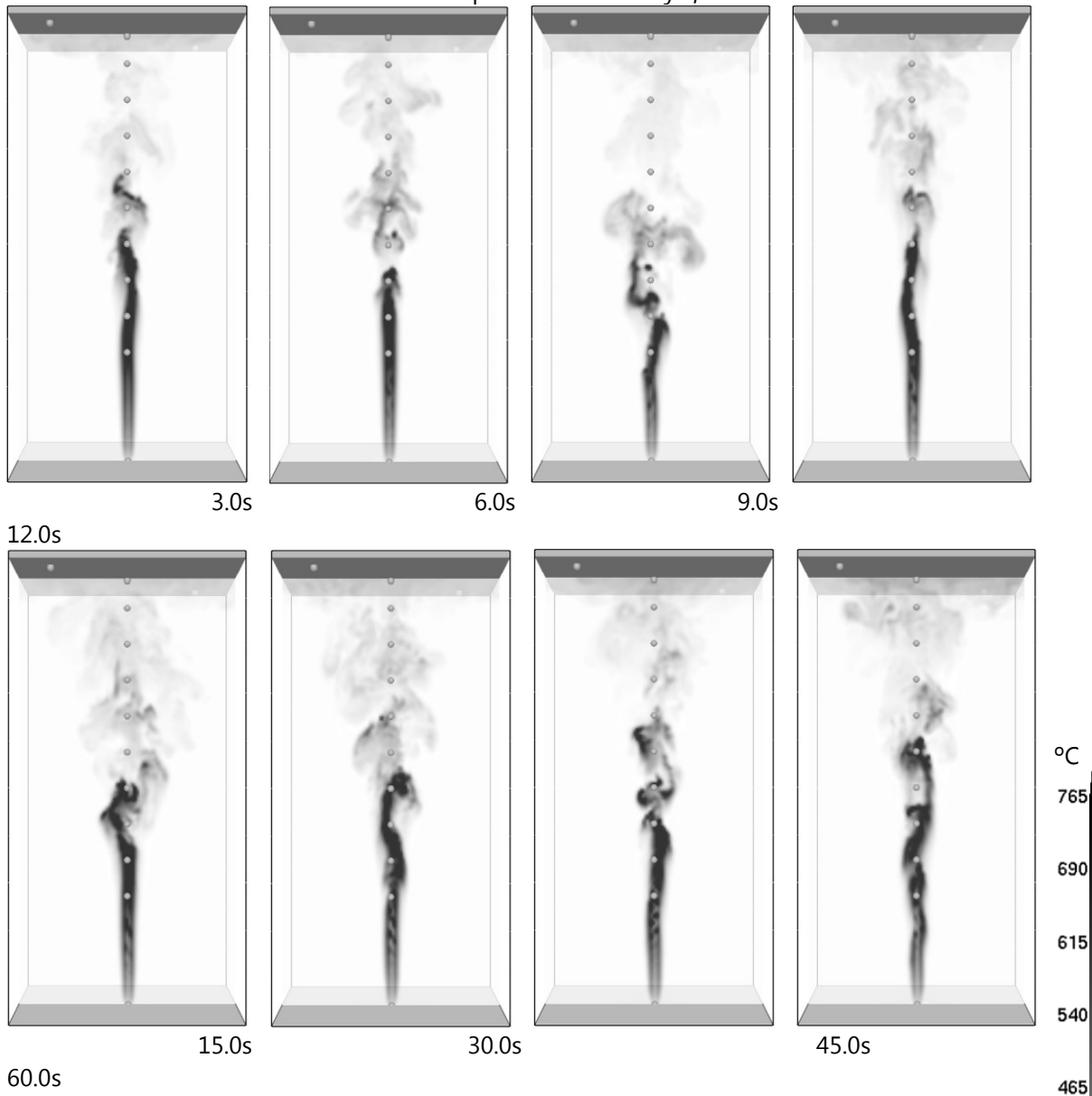


Figura 9: Resultado da liberação de calor (energia) em função do tempo de desenvolvimento do incêndio para o modelo de *jetfire*.



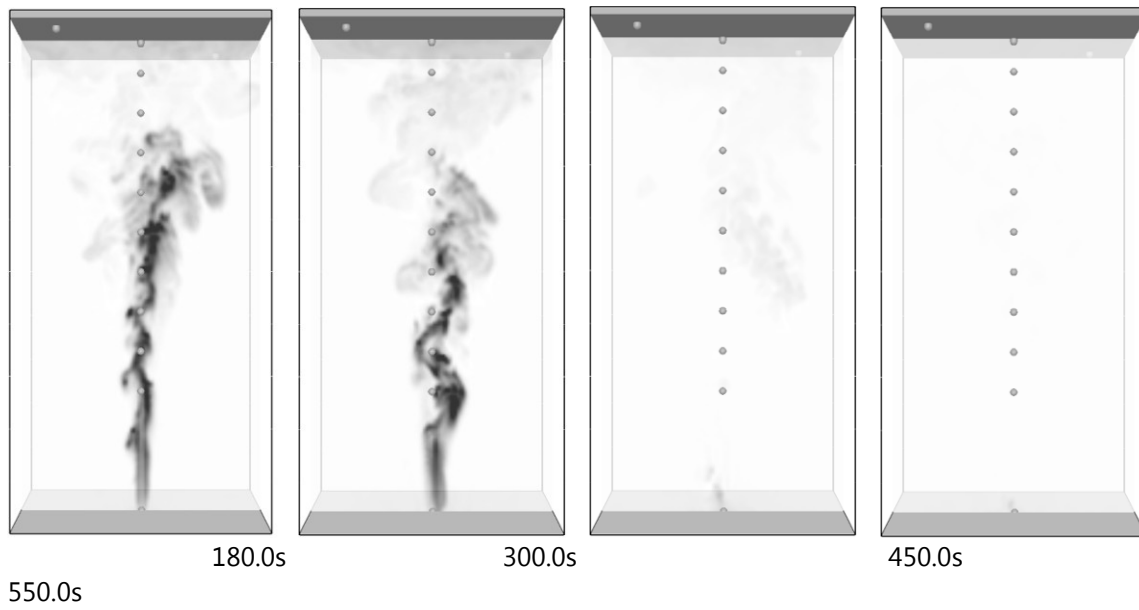


Figura 10: Distribuição de temperaturas no plano xz ($y=1.5\text{m}$) para o modelo de *jetfire* em diferentes instantes de tempo.

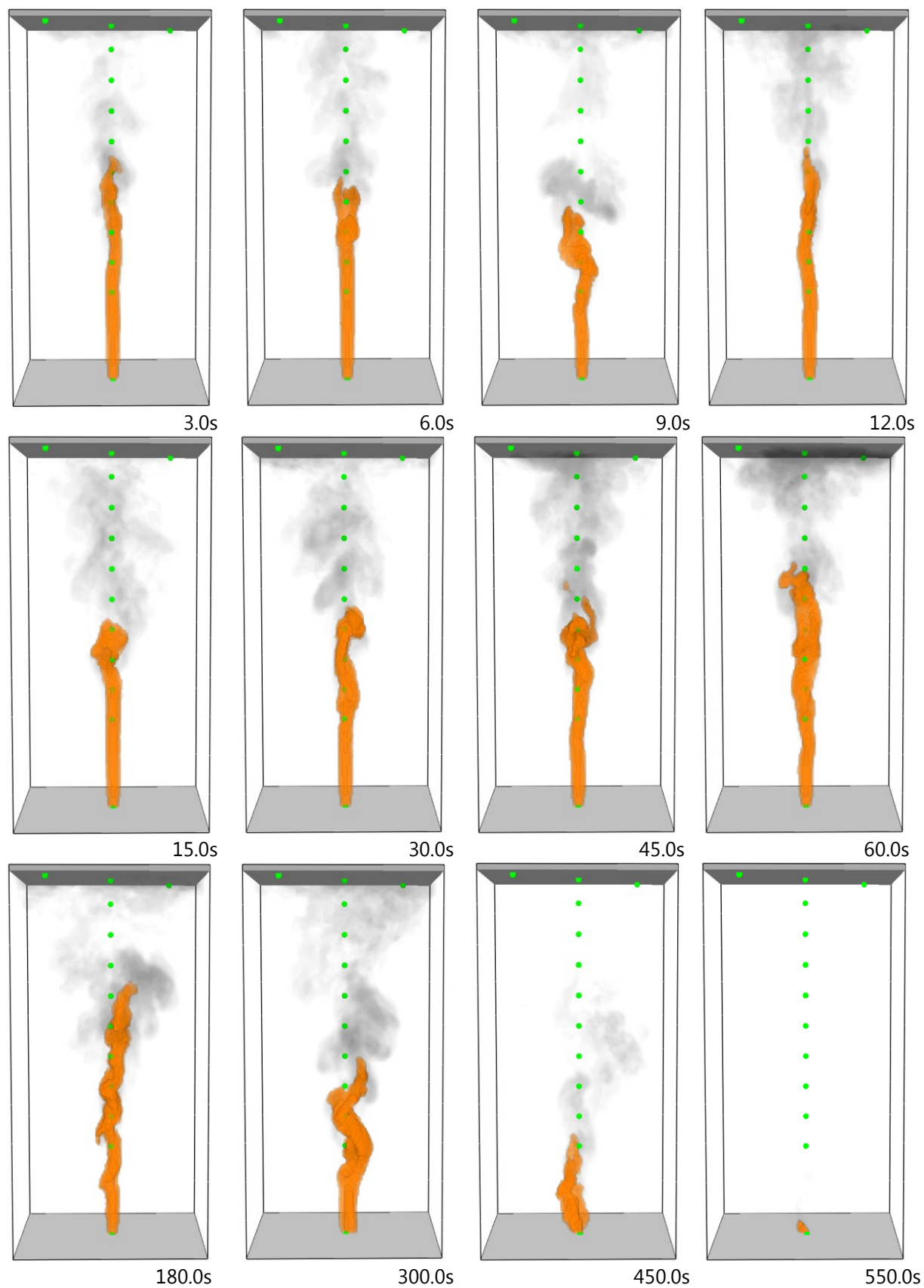


Figura 11: Evolução da chama visível e da fumaça para o modelo de *jetfire*.

4 CONCLUSÕES

A partir dos modelos analisados neste trabalho foi possível avaliar o comportamento dos fluidos e a distribuição de temperatura em ambientes petrolíferos em situação de incêndio. No primeiro cenário de acidente considerado, o combustível foi oriundo de um vazamento de óleo e tratado através do modelo de *poolfire*, os pontos próximos à origem do incêndio mostraram resultados de temperatura próximos às curvas simplificadas durante a fase inicial do incêndio. As chamas atingiram cerca de 5m na fase de maior desenvolvimento do incêndio, todavia as condições de ventilação do compartimento permitiram que os gases quentes se espalhassem rapidamente, reduzindo as temperaturas nas regiões mais distantes do foco do incêndio, como o teto do compartimento. Para o segundo cenário de acidente, representado por um vazamento de gás (propano) e modelado como um *jetfire*, as temperaturas alcançadas chegaram ao máximo de aproximadamente 750°C, devido à carga térmica gerada, da ordem de 415kW/s na fase de desenvolvimento total do incêndio.

Através dos resultados obtidos, evidencia-se que a distribuição espacial da temperatura é grande importância para o entendimento do desenvolvimento do incêndio. Esta distribuição não é alcançada pelos procedimentos simplificados, como as curvas nominais de incêndio, no segundo foco de incêndio estudado, a temperatura no teto do compartimento atinge apenas 150°, a quinta parte da temperatura máxima atingida no modelo. A modelagem dos combustíveis e das condições de ventilação em acordo com as reais condições de cada compartimento permitem uma modelagem cada vez mais próxima a realidade de cada caso, onde é possível considerar caracterização do vazamento e a geometria de cada cenário. A utilização de modelos avançados, como o descrito neste trabalho, para simulação das condições de incêndio, permite o desenvolvimento de análises refinadas, mais realísticas, contribuindo para a manutenção dos níveis de segurança destas instalações, com economia de recursos matérias, devendo desta forma, ser incorporados à prática de projeto de estruturas sob fogo.

REFERÊNCIAS

- Anderson, D., Tannehill, J.C., Pletcher, R.H., *Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer*, Philadelphia, Pennsylvania, Hemisphere Publishing Corporation, 1984.
- Baltatu, M., Eiy, J., Haniey, H., Graboski, M., Perkins, R., Sioan, E., Thermal Conductivity of Coal-Derived Liquids and Petroleum Fractions, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, v. 24, pp. 325-332, 1985.
- Comité Européen de Normalisation, *Eurocode 1 - Actions on Structures - Part 1-2: General Actions - Actions on Structures exposed to fire*, Brussels, 2002.
- Chow, W.K., Li, S.S., Gao, Y., Chow, C.L., Numerical studies on atrium smoke movement and control with validation by field tests, *Building and Environment*, v. 44, n. 6, pp. 1150-1155, 2009.
- Cullen, L., *The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster*, HM Stationery Office, 1990.
- Custer, R. e Meacham, B., *Introduction to Performance-Based Fire Safety*, Society of Fire Protection Engineers, 1977.
- Gutierrez-Montes, C., Sanmiguel-Rojas, E., Viedma, A., Rein, G., Experimental data and numerical

- modelling of 1.3 and 2.3 MW Fires, *Building and Environment*, v. 44, n. 9, pp. 1827-1839, 2009.
- International Maritime Organization, *Guidelines on alternative design and arrangements for fire safety*, London, 2001.
- McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S., Floyd, J., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide*, NIST - National Institute of Standards and Technology, USA, 2010a.
- McGrattan, K., Hostikka, S., Floyd, J., Baum, H., Rehm, R., Mell, W., Mcdermott, R., *Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide*, NIST - National Institute of Standards and Technology, USA, 2010b.
- National Fire Protection Association, *Handbook of Fire Protection Engineering*, Ed. 3, Quincy, Massachusetts, 2002.
- Shen, T.S., Huang, Y.H., Chien, S.W., Using fire dynamic simulation (FDS) to reconstruct an arson fire scene, *Building and Environment*, v. 43, n. 6, pp. 1036–1045, 2008.
- Speight, J., *Handbook of Petroleum Handbook*, Wiley-Interscience, 2001.