

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

**ANÁLISE DE RISCO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO EM TANQUES DE
ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO**

por

Felipe Robinson Silva

Monografia apresentada à Comissão de Graduação do Curso de Engenharia de Energia da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia de Energia.

Porto Alegre, abril de 2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE ENERGIA

ANÁLISE DE RISCO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO EM TANQUES DE
ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO

por

Felipe Robinson Silva

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
BACHAREL EM ENGENHARIA DE ENERGIA.
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

Prof. Flávio Antonio Becon Lemos
Coordenador do Curso de Engenharia de Energia

Orientador: Prof. Dr. Felipe Roman Centeno

Banca examinadora:

Prof. Dr. Guilherme Henrique Fiorot – DEMEC / UFRGS
Eng. Dr. Guilherme Crivelli Fraga – University of Connecticut
Prof. Dr. Luiz Alberto Oliveira Rocha – PROMEC / UFRGS

Porto Alegre, 22 de abril de 2022.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jalmar e Tamara, e irmã, Clarissa, pelo suporte, incentivo e amor ao longo de toda minha trajetória.

À minha namorada, pelo amor, carinho e suporte, tornando mais leves os dias de desenvolvimento do presente trabalho.

Aos meus amigos, pelo incentivo, companheirismo e por compreenderem minha ausência durante os períodos de estudo ao longo do curso.

Aos colegas da engenharia, pela amizade e parceria durante todo curso.

Ao Prof. Felipe Roman Centeno, pela excelente orientação e por estar sempre disponível para responder aos questionamentos e transmitir conhecimento. Agradeço também pela oportunidade da bolsa de iniciação científica, período em que iniciei o aprendizado sobre o software utilizado neste trabalho.

Ao Guilherme Crivelli Fraga, pela atenção e por todos ensinamentos durante o período da bolsa de iniciação científica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, em especial aos professores, por todo conhecimento e experiência compartilhados durante a graduação.

SILVA, F. R. **ANÁLISE DE RISCO DE PROPAGAÇÃO DE INCÊNDIO EM TANQUES DE ARMAZENAMENTO DE COMBUSTÍVEL LÍQUIDO**. 2022. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise de risco de propagação de incêndio em tanques atmosféricos de armazenamento de combustível líquido de uma refinaria de petróleo real. Utilizando o software de dinâmica dos fluidos computacional Fire Dynamics Simulator (FDS), são realizadas simulações para avaliar o fluxo de calor radiativo emitido por um incêndio em um dos tanques. Para validar os resultados do FDS, as medições dos fluxos de radiação térmica são comparadas com dados experimentais de um incêndio em uma piscina de querosene de 30 m de diâmetro. Após a validação, uma seção da refinaria é modelada no software e o incêndio é avaliado em três cenários, sendo o primeiro sem a influência do vento e o segundo e terceiro com velocidades de vento de 2,9 m/s e 9,3 m/s, respectivamente. No caso em que o vento de maior velocidade atinge o local durante a queima do tanque, o fluxo de radiação térmica que incide sobre um dos reservatórios adjacentes ao incêndio supera o limite para ocorrência de efeito dominó de 10 kW/m². São propostas duas abordagens passivas para mitigação do risco de propagação do incêndio. Na primeira, barreiras são posicionadas entre os tanques em que há o risco de efeito dominó. Segundo os resultados das simulações, paredes de concreto de 13 m de altura seriam capazes de atenuar o fluxo de radiação térmica para valores abaixo do limite adotado em qualquer um dos cenários analisados. Na segunda alternativa, é proposto um novo posicionamento para os tanques dentro do mesmo terreno, levando em conta a direção predominante dos ventos. O arranjo alternativo também se mostrou eficaz na mitigação do risco de propagação do incêndio.

PALAVRAS-CHAVE: Efeito Dominó, Incêndio em Piscina, Radiação Térmica, Tanques de Armazenamento.

SILVA, F. R. **RISK ANALYSIS OF FIRE PROPAGATION IN LIQUID FUEL STORAGE TANKS.** 2022. 24. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia de Energia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

ABSTRACT

This paper presents a risk analysis of fire propagation in atmospheric liquid fuel storage tanks of a real oil refinery. Using the computational fluid dynamics software Fire Dynamics Simulator (FDS), simulations are performed to evaluate the radiative heat flux emitted by a fire in one of the tanks. To validate the FDS results, measurements of thermal radiation fluxes are compared with experimental data from a fire in a 30 m diameter kerosene pool. After validation, a section of the refinery is modeled in the software and the fire is evaluated in three scenarios, the first without the influence of the wind and the second and third with wind speeds of 2.9 m/s and 9.3 m/s, respectively. In the case where the higher wind speed reaches the site during the burning of the tank, the thermal radiation flux that affects one of the reservoirs adjacent to the fire exceeds the limit for the occurrence of a domino effect, of 10 kW/m². Two passive approaches are proposed to mitigate the risk of fire propagation. In the first, barriers are placed between the tanks in which there is a risk of domino effect. According to the results of the simulations, concrete walls of 13 m in height would be able to attenuate the flux of thermal radiation to values below the limit adopted in any of the analyzed scenarios. In the second alternative, a new positioning for the tanks within the same terrain is proposed, taking into account the prevailing wind direction. The alternative arrangement also proved to be effective in mitigating the risk of fire propagation.

KEYWORDS: Domino Effect, Pool Fire, Storage Tanks, Thermal Radiation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	Motivação.....	1
1.2	Objetivos	2
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	2
2.1	Tipos de chamas.....	3
2.2	Fire Dynamics Simulator (FDS).....	3
2.2.1	Transporte de espécies químicas.....	3
2.2.2	Conservação de energia	3
2.2.3	Transporte de momentum	4
2.2.4	Equação de transferência radiativa (ETR).....	4
2.2.5	Modelo de gás cinza (GG).....	5
2.2.6	Modelagem do vento atmosférico utilizando a teoria de similaridade de Monin-Obukhov.....	5
2.2.7	Resolução da malha	6
3	METODOLOGIA.....	6
3.1	Modelagem numérica.....	6
3.2	Experimento considerado.....	6
3.3	Estudo de sensibilidade de malha	8
3.4	Modelagem da refinaria no FDS.....	8
3.4.1	Dados climáticos	10
3.5	Risco de efeito dominó.....	12
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	13
4.1	A influência do <i>path length</i>	13
4.2	Análise de malha e validação das simulações	14
4.3	Simulação de incêndio em tanque de armazenamento da refinaria.....	15
4.4	Alternativas para mitigação do risco de efeito dominó	18
5	CONCLUSÕES.....	21

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

O aumento da demanda por energia está diretamente ligado à manutenção e ascensão dos padrões de vida da civilização, sendo os combustíveis fósseis a principal fonte de obtenção de energia desde a revolução industrial até o atual momento (COELHO; COSTA, 2007). No Brasil, há crescente participação da eletricidade na matriz energética, porém os combustíveis derivados de petróleo ainda são essenciais, principalmente para o setor de transportes. Segundo o Balanço Energético Nacional de 2020 (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE, 2021), a oferta de petróleo e seus derivados foi de 95,2 Mtep (milhões de tep – tonelada equivalente de petróleo), representando 33,1% da oferta total de energia.

A cadeia do petróleo, desde a extração até o uso final, demanda processos de alto valor agregado, sendo as refinarias responsáveis pela transformação do óleo bruto nos diversos derivados, como gasolina, óleo diesel e querosene. Um dos componentes importantes em refinarias e indústrias petroquímicas - não se limitando a essas - são os tanques de armazenamento, que são destinados à armazenagem de fluidos à pressão atmosférica (tanques atmosféricos) ou superior (tanques pressurizados).

Devido à grande quantidade de material inflamável contida nos tanques, há constante preocupação com a segurança desses equipamentos. Apesar de raros, incêndios de larga escala em tanques de armazenamento apresentam um grande desafio para equipes de combate a incêndios, para a indústria do petróleo, bem como para o meio ambiente (PERSSON; LÖNNERMARK, 2004). Ainda como apontam os autores, descargas atmosféricas são a fonte mais comum de ignição desses incêndios.

Em refinarias de petróleo, comumente existem grandes quantidades de tanques atmosféricos adjacentes (fazendas de tanques). Segundo a análise de 480 incêndios em tanques ocorridos entre os anos de 1950 e 2003, uma parte substancial dos eventos envolveu vários reservatórios e, em muitos casos, resultou na queima total do conteúdo armazenado (PERSSON; LÖNNERMARK, 2004). Conforme estudado por Cozzani, Tugnoli e Salzano (2009), esse tipo de incêndio pode causar graves acidentes secundários em outros equipamentos da planta em questão devido à emissão de radiação térmica. Essa sequência de acidentes é comumente conhecida por “efeito dominó”. De acordo com Landucci et al., (2009), caso o tempo de mitigação eficaz do incêndio for de 30 minutos, um fluxo de radiação de 10 kW/m² já tem o potencial de causar falhas a um tanque atmosférico. Dessa forma, torna-se ainda mais importante a segurança desses equipamentos, pois um único incidente pode ser capaz de gerar uma reação em cadeia.

Como exemplo no Brasil, a explosão de uma das bombas causou um incêndio que atingiu seis tanques de etanol e gasolina no terminal de combustíveis da empresa Ultracargo no Porto de Santos (SP) (Figura 1.1). O incêndio teve início no dia 2 de abril de 2015 e foi completamente extinto no dia 10, após nove dias de combate às chamas. Segundo o engenheiro de segurança e ex-presidente da Associação Paulista de Engenheiros de Segurança do Trabalho (APAEST) Celso Atienza, em entrevista à Gil (2015) no portal APAEST, o desastre foi causado por uma sucessão de erros, sendo um deles o não obediência da distância necessária entre os reservatórios para que o fogo não se propagasse tão rapidamente.

Figura 1.1 – Fotografia do incêndio no terminal da Ultracargo em Santos (SP).



Fonte: Exame, 2015.

A partir do momento que o teto do tanque colapsa e o combustível fica exposto, o incêndio pode ser classificado como um incêndio em piscina (ou *pool fire*). Esses são caracterizados por chamas não pré-misturadas turbulentas - em que o combustível e o oxidante estão inicialmente separados - que se desenvolvem pela combustão de material que evapora de uma camada líquida. Como classificado por Vasanth (2014), incêndios em poça dependem do meio em que são formados, presença ou não de confinamento e o tipo de local. A emissão de radiação térmica dessas chamas depende do material em combustão, uma vez que ela se dá devido aos produtos da reação e à formação de fuligem.

Dada a relevância de incêndios de larga escala em tanques e o risco de efeito dominó, faz-se necessário o estudo de modelos capazes de prever o comportamento da chama e do fluxo de calor radiante emitido durante sua ocorrência. Soluções numéricas podem ser utilizadas para simular esses incêndios em softwares de dinâmica dos fluidos computacional (*CFD – computational fluid dynamics*). Masum Jujuly et al., (2015) utiliza o software ANSYS CFX-14 para a simulação de um incêndio de uma piscina de gás natural liquefeito no terreno de uma usina termoeletrica, avaliando os fluxos de radiação térmica incidentes em equipamentos, bem como a influência do vento. No estudo de Ahmadi et al., (2019), o software Fire Dynamics Simulator (FDS) é adotado para simular incêndios em uma fazenda de tanques de armazenamento, avaliando o potencial de efeito dominó, com base em medições de fluxo de calor radiante incidente nos reservatórios.

Ryder et al., (2004) simulou dois experimentos no FDS, sendo o primeiro de pequena escala e o segundo um incêndio em uma piscina de 15 m de diâmetro. Validando os resultados com dados experimentais, eles concluíram que o FDS é ideal para modelagem de incêndios em grande escala. O software apresenta uma série de vantagens sobre os códigos CFD tradicionais, sendo possível obter soluções transientes de incêndios com hardware menos sofisticado (menor custo computacional). O FDS está em desenvolvimento há quase 25 anos e já foi verificado e validado em diversos cenários de incêndio (MCGRATTAN et al., 2006).

Entendendo a importância do tema, o presente trabalho consiste na adoção do FDS para a simulação de incêndios em tanques de armazenamento de querosene de uma refinaria de petróleo de geometria real. Através de dispositivos de medição, são avaliados os fluxos de radiação térmica incidentes nos tanques adjacentes com e sem a influência do vento. Comparando os resultados das simulações com valores disponíveis na literatura, é possível estimar o potencial risco de efeito dominó causado pelo incêndio e analisar alternativas para aumentar a segurança da planta.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a possibilidade de propagação do incêndio em um tanque de armazenamento para outros reservatórios adjacentes em uma refinaria de petróleo. Para tanto, são estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1. Validar os resultados das simulações do FDS a partir da comparação com os dados experimentais de fluxos de radiação térmica emitidos por chamas de grande escala apresentados em Yamaguchi; Wakasa, (1986);
2. Modelar uma seção da refinaria no FDS e simular um incêndio em um dos tanques, avaliando os fluxos de calor radiante incidentes nos tanques adjacentes com e sem a influência do vento;
3. Comparar os fluxos de calor por radiação obtidos nas simulações com valores de referência para ocorrência do efeito dominó em tanques de armazenamento atmosféricos;
4. Propor e testar numericamente alternativas para mitigação do risco de propagação de incêndios nos reservatórios.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para o desenvolvimento do trabalho, são necessários conhecimentos teóricos de combustão, transferência de calor e massa e mecânica dos fluidos. Nesta seção, são abordados alguns conceitos importantes no embasamento do estudo.

2.1 Tipos de chamas

Chamas podem ser classificadas como pré-misturadas e não pré-misturadas, conforme for a condição de mistura dos reagentes e do oxidante. Em chamas pré-misturadas, antes de ocorrer a ignição da mistura, o combustível e o oxidante são previamente misturados a nível molecular. Motores à combustão interna de ignição por centelha são um exemplo de aplicação desse tipo de chama, onde o combustível e o oxidante são misturados antes da ignição na câmara de combustão, permitindo uma queima intensa e controlada em um pequeno volume. Em chamas não pré-misturadas (ou chamas difusivas), os reagentes estão inicialmente separados e a combustão e a mistura ocorrem simultaneamente na interface entre o combustível e o oxidante. Chamas desse tipo são amplamente utilizadas industrialmente em caldeiras e fornalhas.

Também é importante classificar as chamas em relação ao seu escoamento, que pode ser laminar ou turbulento. Chamas laminares são caracterizadas por um comportamento de queima ordenado e bem definido, apresentando uma frente de chama estável, sendo a difusão molecular o único processo de mistura entre o combustível e o oxidante. Aplicações desse tipo de chamas incluem fogões e fornos a gás e aquecedores e queimadores do tipo bico de Bunsen. Já chamas turbulentas são caracterizadas por apresentarem flutuações nas distribuições de velocidade, temperatura e concentração de espécies ao longo do tempo. A turbulência causa aumento na taxa de mistura e de queima dos reagentes, acarretando em maior energia química liberada na combustão. Chamas turbulentas são encontradas, por exemplo, em caldeiras, motores à combustão e incêndios em piscinas (COELHO; COSTA, 2007).

2.2 Fire Dynamics Simulator (FDS)

Após o entendimento dos tipos de chamas e suas características, são apresentadas, de forma sintetizada, as equações governantes do software utilizado nas simulações de incêndios.

2.2.1 Transporte de espécies químicas

Para as simulações em CFD desse trabalho, são resolvidas equações de transporte de espécies químicas, conservação de massa, energia e momentum. O transporte de espécies químicas é dado por:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho Z_\alpha) + \nabla \cdot (\rho Z_\alpha \mathbf{u}) = \nabla \cdot (\rho D_\alpha \nabla Z_\alpha) + \dot{m}_\alpha''' + \dot{m}_{b,\alpha}''' \quad (2.1)$$

sendo ρ a massa específica do fluido, Z_α a fração mássica de uma espécie α , $\mathbf{u}(u, v, w)$ o vetor de velocidade, D_α o coeficiente de difusão mássica de uma espécie α , \dot{m}_α''' a taxa de produção de massa por unidade de volume de uma espécie α por reações químicas e $\dot{m}_{b,\alpha}'''$ a taxa de produção de massa por unidade de volume de uma espécie α por evaporação de gotas/partículas.

Somando a Equação (2.1) para todas as espécies participantes, obtém-se a conservação de massa, expressa por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = \dot{m}_b''' \quad (2.2)$$

uma vez que, por definição, $\sum Z_\alpha = 1$, $\sum \dot{m}_\alpha''' = 0$ e $\sum \dot{m}_{b,\alpha}''' = \dot{m}_b'''$. Também é assumido que $\sum \rho D_\alpha \nabla Z_\alpha = 0$ (MCGRATTAN et al., 2020a).

2.2.2 Conservação de energia

A partir de uma aproximação de baixo número de Mach, é possível expressar a conservação de energia em termos da entalpia sensível h_s :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla \cdot (\rho h_s \mathbf{u}) = \frac{D\bar{p}}{Dt} + \dot{q}''' + \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' \quad (2.3)$$

onde $\bar{p}(z, t)$ é a pressão de fundo, \dot{q}''' é a taxa de liberação de calor por unidade de volume da reação química e \dot{q}_b''' é a energia transferida para gotas/partículas de escala menor do que a malha. O termo \dot{q}'' representa os fluxos de calor por condução, difusão e radiação e é dado por:

$$\dot{q}'' = -k\nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Z_{\alpha} + \dot{q}_r'' \quad (2.4)$$

sendo k a condutividade térmica, T a temperatura e \dot{q}_r'' o fluxo de calor por radiação (MCGRATTAN et al., 2020a).

2.2.3 Transporte de momentum

Definindo a energia de estagnação por unidade de massa como $H \equiv |\mathbf{u}|^2/2 + \tilde{p}/\rho$, pode-se expressar a equação do momentum por:

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} - \mathbf{u} \times \boldsymbol{\omega} + \nabla H - \tilde{p} \nabla \left(\frac{1}{\rho} \right) = \frac{1}{\rho} [(\rho - \rho_0)\mathbf{g} + \mathbf{f}_b + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}] \quad (2.5)$$

onde $\boldsymbol{\omega}(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$ é o vetor de vorticidade, $\tilde{p}(x, y, z, t)$ é a pressão de perturbação, \mathbf{g} é a aceleração da gravidade, \mathbf{f}_b é a força de arrasto exercida pelas gotas/partículas de escala menor do que a malha e $\boldsymbol{\tau}$ é a tensão viscosa (MCGRATTAN et al., 2020a).

2.2.4 Equação de transferência radiativa (ETR)

A transferência de calor radiativo é determinada pela equação de transferência radiativa (ETR), uma equação integro-diferencial que faz o balanço de energia radiativa do meio participante. A solução da ETR é difícil, uma vez que os gases produtos da combustão, como H_2O e CO_2 , apresentam complexa dependência do espectro radiativo, que pode envolver de milhares a milhões de linhas espectrais (MODEST; HAWORTH, 2016).

A ETR para um meio que absorve, emite e espalha radiação é dada por (VISKANTA; MENGÜÇ, 1987):

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = -\kappa(\mathbf{x}, \lambda) I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) - \sigma_s(\mathbf{x}, \lambda) I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + B(\mathbf{x}, \lambda) + \frac{\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)}{4\pi} \int_{4\pi} \Phi(\mathbf{s}', \mathbf{s}) I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s}') ds' \quad (2.6)$$

onde $I_{\lambda}(\mathbf{x}, \mathbf{s})$ é a intensidade de radiação em um comprimento de onda λ , \mathbf{s} é o vetor de direção da intensidade de radiação, $\kappa(\mathbf{x}, \lambda)$ e $\sigma_s(\mathbf{x}, \lambda)$ são, respectivamente, os coeficientes de absorção local e espalhamento e $B(\mathbf{x}, \lambda)$ é o termo fonte de emissão de calor. A integral ao final da equação descreve o ganho de energia por espalhamento interno.

Assumindo um meio sem espalhamento, a ETR pode ser expressada por (MCGRATTAN et al., 2020a):

$$\mathbf{s} \cdot \nabla I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) = -\kappa(\mathbf{x}) I(\mathbf{x}, \mathbf{s}) + B(\mathbf{x}) \quad (2.7)$$

O termo fonte é função de um coeficiente de absorção de Planck κ_p e da intensidade de radiação de corpo negro I_b , $B(\mathbf{x}) = \kappa_p(\mathbf{x}) I_b(\mathbf{x})$. A intensidade de corpo negro, por sua vez, é função da temperatura T elevada na quarta potência, $I_b(\mathbf{x}) = \sigma T(\mathbf{x})^4/\pi$, onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann.

2.2.5 Modelo de gás cinza (GG)

O método linha-por-linha é capaz de determinar o fluxo de radiação, através da resolução da ETR para todos os números de onda, tornando-se inviável para aplicações práticas, devido ao elevado custo computacional. Como alternativa ao método linha-por-linha, desenvolveram-se modelos para simplificar a abordagem espectral da determinação do fluxo de calor radiativo, sendo o mais simples deles o modelo de gás cinza (*GG – gray gas*), que desconsidera as variações espectrais das propriedades radiativas. Apesar de ser frequentemente utilizado por ser menos custoso na determinação do campo de radiação, o modelo de GG pode levar à relevantes incertezas na modelagem da radiação térmica de gases.

No modelo de GG, as variações do coeficiente de absorção do meio no espectro de radiação são negligenciadas, sendo $\kappa_p = \kappa$. Dessa forma a RTE é dada por (MCGRATTAN et al., 2020a):

$$s \cdot \nabla I(x, s) = \kappa(x)[I_b(x) - I(x, s)] \quad (2.8)$$

O coeficiente κ é uma função da composição da espécie e temperatura. Seus valores são obtidos a partir de um modelo de banda estreita chamado RadCal. O coeficiente de absorção efetivo para uma banda espectral (n) e espécie participante (i), $\kappa_{n,i,e}(Y_i, T, S)$, é definido por (MCGRATTAN et al., 2020a):

$$\kappa_{n,i,e}(Y_i, T, S) = -\frac{1}{S} \ln \left(\frac{I_{tot} - I_b(T)}{I_b(T_{rad}) - I_b(T)} \right) \quad (2.9)$$

sendo Y_i a fração mássica de cada espécie, S é o comprimento do caminho (*path length*), I_{tot} é a intensidade total de radiação e T_{rad} é a temperatura efetiva da radiação da chama.

Segundo Howell et al., (2021), o *path length* pode ser calculado através da seguinte expressão:

$$S = \frac{3,6V}{A} \quad (2.10)$$

onde V o volume de todo o domínio e A a área total da vizinhança.

2.2.6 Modelagem do vento atmosférico utilizando a teoria de similaridade de Monin-Obukhov

É possível prescrever vento no FDS de três maneiras, sendo o método mais indicado pelo manual do software a modelagem da camada limite atmosférica através da teoria de similaridade de Monin-Obukhov. O perfil de velocidade do vento, u , e a temperatura potencial, θ , variam com a altura, z , conforme as expressões (MCGRATTAN et al., 2020b):

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (2.11)$$

$$\theta(z) = \theta_0 + \frac{\theta_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \Psi_h \left(\frac{z}{L} \right) \right] \quad (2.12)$$

sendo u_* a velocidade de fricção, $\kappa = 0,41$ a constante de Von Kármán, z_0 o comprimento de rugosidade aerodinâmica, θ_* a temperatura potencial de escala, θ_0 a temperatura potencial ao nível do solo e L é o comprimento de Obukhov. As funções de similaridade Ψ_m e Ψ_h podem ser encontradas em McGrattan et al., (2020b).

2.2.7 Resolução da malha

Uma grandeza útil para mensurar o tamanho de malha, dx , adequado para simulações no FDS é a resolução, dada por $R = D^*/dx$ onde diâmetro característico da chama, D^* , é dado por (MCGRATTAN et al., 2020b):

$$D^* = \left(\frac{\dot{Q}}{\rho_{\infty} c_p T_{\infty} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (2.13)$$

sendo \dot{Q} a taxa total de liberação de calor da chama, ρ_{∞} a massa específica do ar, c_p o calor específico do ar, T_{∞} a temperatura ambiente e g a aceleração da gravidade.

3 METODOLOGIA

Nas subseções a seguir, são apresentadas a modelagem numérica das equações expostas anteriormente, bem como a descrição do experimento considerado e os dados de entrada para a simulação da refinaria no FDS.

3.1 Modelagem numérica

As equações descritas na fundamentação teórica (2.1 a 2.9, 2.11 e 2.12) são resolvidas numericamente no *solver* do software de código aberto em Fortran, FDS (MCGRATTAN et al., 2020b), fornecido pelo Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos. O modelo do FDS, na configuração padrão, resolve as equações de transporte de massa, momentum e energia para um escoamento tridimensional e de baixo número de Mach em um sistema de coordenadas cartesianas.

A turbulência é resolvida através do modelo matemático de simulação de grandes escalas (*LES – large eddy simulation*) (SMAGORINSKY, 1963). Nesse método, apenas os grandes vórtices são diretamente calculados e os vórtices filtrados são modelados, reduzindo consideravelmente o custo computacional quando comparado com a simulação numérica direta (*DNS – direct numerical simulation*). O modelo do FDS aplica a LES a partir de um filtro passa-baixa com largura equivalente ao tamanho da célula da malha local. Com números de Schmidt e Prandtl constantes, uma variação do modelo de Deardorff (DEARDORFF, 1980) é adotada para determinar a viscosidade turbulenta necessária para a solução da equação de Navier-Stokes.

O mecanismo de combustão é descrito pela reação completa, em passo único, de combustível e oxidante. A aproximação de espécies aglomeradas é utilizada, determinando a taxa de reação de cada espécie assumindo química infinitamente rápida através do modelo de conceito de dissipação de turbilhão (*EDC – Eddy Dissipation Concept*) (MAGNUSSEN; HJERTAGER, 1977). Essa aproximação é frequentemente utilizada em simulações de chamas de larga escala para redução do custo computacional.

As integrações direcionais e espaciais da ETR são resolvidas através do método de volumes finitos (*FVM – finite volume method*) de Raithby e Chui (1990). A dependência espectral dos coeficientes de absorção do meio é representada pelo modelo de GG, previamente exposto neste trabalho. Esses são os principais métodos utilizados na modelagem física e numérica do software e mais detalhes são descritos em MCGRATTAN et al., (2020a).

3.2 Experimento considerado

Para análise de sensibilidade de parâmetros de entrada e validação das simulações do FDS, foi considerado um experimento prático para comparação de resultados. Yamaguchi e Wakasa, (1986) estudaram experimentalmente o comportamento de incêndios em piscinas de grande escala. Foram analisadas as queimas de piscinas de querosene de 30 m, 50 m e 80 m de diâmetro, através da avaliação de diversos fatores, incluindo o fluxo de calor radiante. As medições foram realizadas por sensores posicionados a distâncias de 1D, 2D, 3D e 4D do centro do tanque, sendo D o diâmetro deste.

Para o presente trabalho, a validação baseia-se no experimento da piscina de 30 m de diâmetro, uma vez que a refinaria real que será estudada neste trabalho possui tanques com diâmetro próximo desse valor. Conforme adaptação de Ahmadi et al., (2019), os parâmetros de entrada referentes à simulação do incêndio são apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada para simulação do experimento.

Parâmetro	Valor
Combustível	Querosene (dodecano)
Diâmetro da piscina (m)	30
Altura do tanque (m)	0,45
Quantidade de fuligem (kg/kg)	0,042
Temperatura ambiente (°C)	21
Taxa média de queima de massa por área (kg/m ² .s)	0,063
Fração radiante	0,08
Dimensões do domínio [$x \times y \times z$] (m)	320×320×150
Tempo total de simulação (s)	300
Número de ângulos sólidos	500

Fonte: Adaptado de Ahmadi et al., (2019).

O querosene é composto por uma mistura complexa de hidrocarbonetos e não possui uma composição química definida. Normalmente, contém de 10 a 16 átomos de carbono por molécula, sendo em média de 12 (CURL; DONNELL, 1977). Portanto, como no FDS não é possível prescrever diretamente querosene como combustível, prescreve-se o dodecano (C₁₂H₂₆).

Existem diversas alternativas para descrever a pirólise de sólidos e líquidos no FDS. Nas simulações realizadas, é aplicado o modelo de pirólise simples, não sendo necessário prescrever o poder calorífico do combustível. A declaração da taxa média de queima de massa por área, ou *Mass Loss Rate Per Unit Area* (MLRPUA), já é suficiente.

O tanque é modelado como uma obstrução sólida de dimensões de 32 m × 32 m × 0,45 m. Em sua superfície superior, é prescrita uma abertura, ou *VENT*, de 30 m de diâmetro orientada para a direção positiva do eixo z, por onde se desenvolverá a chama. Nesta abertura é prescrita a MLRPUA.

O domínio adotado tem dimensões suficientes para englobar toda a chama, bem como os dispositivos de medição a 30 m, 60 m, 90 m e 120 m de distância horizontal do centro do tanque. As superfícies laterais e superior do domínio são definidas como abertas. Conforme o experimento, são posicionados medidores de fluxo de radiação térmica capazes de realizar medições longe de superfícies sólidas, chamados de *Radiative Heat Flux Gas* no FDS. Os dispositivos são instalados na altura da superfície do tanque (0,45 m) e orientados para chama. As dimensões do domínio são mantidas para todas as simulações do trabalho.

O número de ângulos sólidos é um parâmetro importante para a correta avaliação da radiação térmica. A discretização com número de ângulos inadequado pode resultar em uma distribuição de calor radiante não uniforme, especialmente para alvos distantes da chama (LIN et al., 2010). Conforme analisado por Ahmadi et al., (2019), para uma distância de até 7 diâmetros do centro da chama, o número de 500 ângulos fornece bons resultados, sem demandar um custo computacional elevado. Por essa razão, esse valor é adotado para todos os casos simulados.

Outro parâmetro fundamental no cálculo da radiação térmica é o comprimento médio do caminho do feixe, ou *path length* (S). Por padrão, na versão 6.7.5 do FDS, S tem valor de 10 cm. Em versões anteriores, como na 6.0.1, S era definido como sendo uma função da célula da grade, equivalendo a cinco vezes o comprimento característico de uma célula (FRAGA et al., 2019; MCGRATTAN et al., 2013). Em ambas versões, o usuário pode prescrever um valor qualquer para essa grandeza. Uma abordagem alternativa para definir o valor de S , é considerá-lo como sendo equivalente ao comprimento médio do feixe do domínio computacional inteiro, conforme apresentado na seção 2.2.5. Logo, torna-se interessante avaliar a influência desse parâmetro nos fluxos de radiação térmica medidos pelos dispositivos, comparando as três abordagens.

A simulação tem tempo total de duração de 300 s. Esse período deve ser suficiente para que a chama se desenvolva completamente e atinja uma taxa de liberação de calor, ou *Heat Release Rate* (HRR) aproximadamente estável.

Todas as simulações são realizadas utilizando hardware pessoal do Autor, que inclui um processador Intel® Core™ i5-10400 (6 núcleos e 12 processadores lógicos) e 16 GB de memória RAM. São adotadas as versões 6.7.5 do FDS e 6.7.15 do *Smokeview*, que é a ferramenta utilizada para visualizar as soluções numéricas geradas pelo FDS.

3.3 Estudo de sensibilidade de malha

Simulações no FDS são sensíveis ao tamanho de malha prescrito. Quanto menor o comprimento característico das células, maior será o número de volumes presente no domínio e, conseqüentemente, maior o custo computacional. Caso a malha tenha baixa resolução (malha grosseira), o número de volumes será menor, diminuindo a demanda computacional, bem como a qualidade dos resultados. Conforme Stroup e Lindeman, (2013), o valor de resolução, R , entre 4 e 16 fornece resultados satisfatórios, sem tornar o tempo da simulação excessivamente longo.

Conforme apresentado na subseção 2.2.7, para determinar a dimensão da malha para cada resolução, é necessário calcular o valor de D^* . Multiplicando o MLRPUA pelo poder calorífico do combustível, obtém-se a taxa de liberação de calor por unidade de área, ou *Heat Release Rate Per Unit Area* (HRRPUA). A taxa total de calor esperada é determinada pelo produto do HRRPUA pela área da piscina de 30 m de diâmetro. Os valores dos parâmetros para cálculo do diâmetro característico da chama são apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Parâmetros para cálculo do diâmetro característico da chama.

Parâmetro	Valor
Poder calorífico (kJ/kg)	43.200
HRRPUA (kW/m ²)	2721,6
\dot{Q} (kW)	$1,92 \times 10^6$
ρ_∞ (kg/m ³)	1,204
c_p (kJ/kg.K)	1,005
T_∞ (K)	294
g (m/s ²)	9,807

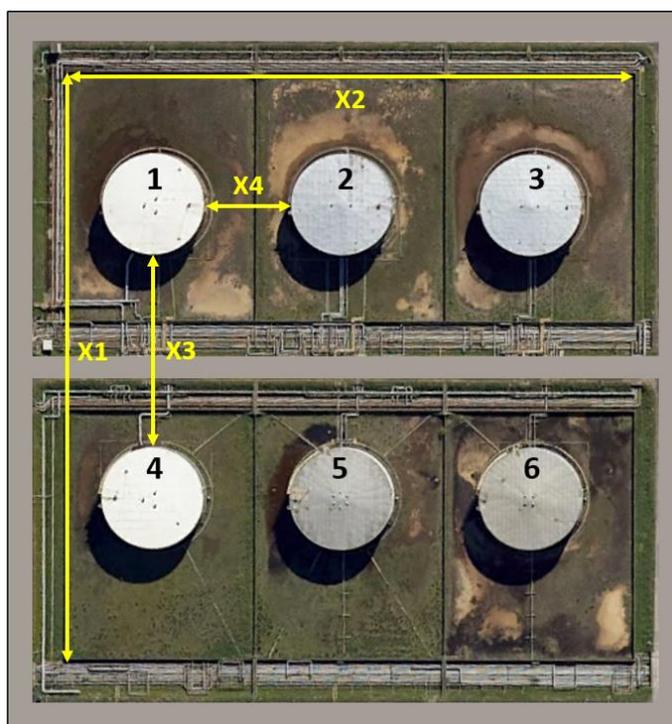
Fonte: Hurley, (2016) e Autor.

Durante a validação dos resultados das simulações do FDS, são testadas as resoluções de malha de 4, 10 e 16. A análise de sensibilidade é baseada nas medições de fluxo de calor radiante do experimento citado na subseção anterior, avaliando a mudança nos resultados entre os diferentes comprimentos de malha prescritos.

3.4 Modelagem da refinaria no FDS

Para a modelagem do problema objetivo no software, inicialmente foi selecionada uma refinaria real, através de imagens de satélite do Google Earth. Observando todo o terreno da fazenda de tanques, selecionou-se uma seção que apresenta reservatórios atmosféricos de diâmetros semelhantes ao do experimento da validação e que estejam posicionados próximos a outros tanques. Uma imagem do perímetro analisado é apresentada na Figura 3.1. Nesse estudo os tanques são numerados de 1 a 6 para facilitar a referência. As dimensões da seção escolhida ($X1$ e $X2$), o diâmetro dos tanques (D), bem como as distâncias entre cada um deles ($X3$ e $X4$), são obtidas através de ferramentas de medição próprias do software que fornece as imagens. Os valores medidos são apresentados na Tabela 3.3.

Figura 3.1 – Imagem de satélite da seção selecionada da refinaria.



Fonte: Adaptado de Google Earth, (2022).

Tabela 3.3 – Diâmetro dos tanques e distâncias de separação.

Parâmetro	Valor
D (m)	27
X1 (m)	160
X2 (m)	150
X3 (m)	52
X4 (m)	22

Fonte: Google Earth, (2022).

No FDS, a malha computacional é sempre composta por elementos retangulares, logo, não é possível modelar obstruções cilíndricas conforme os tanques reais. A modelagem desses objetos é realizada utilizando um refinamento de malha localizado através da função *MULT*. Deste modo, é possível tornar os volumes menores e multiplicá-los para formar objetos aproximadamente circulares. Ao utilizar essa abordagem, é necessário levar em conta que o refinamento pode consumir uma quantidade representativa de memória, uma vez que cada elemento se torna uma obstrução (MCGRATTAN et al., 2020b).

Apesar da possibilidade de prescrever os tanques com formato aproximadamente cilíndrico no FDS, a *VENT* por onde se desenvolve a chama, mesmo que circular, é definida por um retângulo. Como toda e qualquer *VENT* deve ser associada a uma superfície sólida, não é possível posicioná-la com as dimensões necessárias sobre um tanque cilíndrico de mesmo raio. Dessa forma, o tanque em que ocorre o incêndio deverá ser determinado como uma obstrução em forma de prisma quadrangular.

Como não é possível medir diretamente a altura dos tanques (*H*) pelas imagens de satélite, para grandes tanques de armazenamento, essa dimensão é estimada pela seguinte equação (BROWNELL; YOUNG, 1968):

$$H = \frac{3}{8} D \quad (3.1)$$

sendo D o diâmetro do tanque. Essa relação de proporções é determinada pelo autor a partir da otimização de custos, levando em consideração o preço das paredes (costado) em relação ao preço do fundo e do teto do tanque. É assumido que todos os tanques analisados têm as mesmas dimensões de diâmetro e altura.

3.4.1 Dados climáticos

Para obtenção dos dados climáticos da região da refinaria, acessa-se o Banco Nacional de Dados Meteorológicos (BNDMET), onde é possível selecionar diversas estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA). Como não existem dados climáticos específicos do local da refinaria, seleciona-se a estação mais próxima dela, estando a cerca de 7,5 km de distância. As medições de vento dessa estação são tomadas a 10 m de altura do solo.

A estação escolhida apresenta histórico de medições desde o final do ano de 2001 até o atual momento. Observando tendências de variação da velocidade do vento, possivelmente causadas pela expansão urbana na região, foram selecionados os dados mensais de janeiro de 2012 até dezembro de 2021. A NBR17505-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015) não especifica nenhuma metodologia para análise da influência do vento sobre os tanques. Como o presente estudo trata da simulação de um incêndio acidental que pode acontecer em qualquer época do ano, é feita a média do histórico das medições de cada parâmetro, com exceção da direção predominante do vento. Essa última é determinada através da análise de frequência de ocorrência de cada uma das direções (gráfico rosa dos ventos). Os dados pertinentes às simulações estão apresentados na Tabela 3.4.

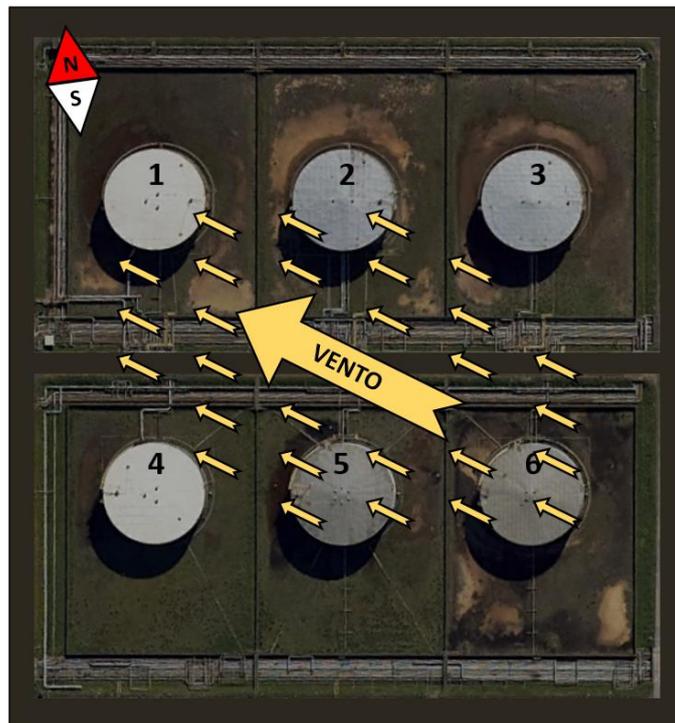
Tabela 3.4 – Dados climáticos para a região da refinaria.

Parâmetro	Valor
Umidade relativa do ar média (%)	77,25
Pressão atmosférica média (Pa)	101415
Temperatura média (°C)	20,19
Direção predominante do vento na região (°)	122,75
Direção predominante do vento na refinaria (°)	118,75
Velocidade média do vento (m/s)	2,9
Velocidade máxima média do vento (m/s)	9,3

Fonte: INMET, (2022).

A direção predominante do vento apontada pela análise dos dados está de acordo com o indicado pelo Atlas Eólico do Rio Grande do Sul (ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL, 2014). Também segundo esse, a direção mais frequente é correspondente à direção de ventos de maior velocidade. Tal fato foi confirmado através da análise das direções horárias dos meses com as maiores velocidades médias. O valor de velocidade máxima média de 9,3 m/s também é plausível, uma vez que nos meses mais ventosos é comum que a velocidade média horária seja de pelo menos 10 m/s. Na Figura 3.2, é apresentada a orientação da refinaria e a direção predominante dos ventos que incidem sobre ela.

Figura 3.2 – Orientação da refinaria e direção predominante dos ventos.



Fonte: Adaptado de Google Earth, (2022).

Para a prescrição do vento no FDS, é adotada a teoria de similaridade de Monin-Obukhov, conforme exposto na subseção 2.2.6. A determinação do comprimento de Obukhov (L), envolve a classificação da estabilidade atmosférica. Conforme o manual do software, a Tabela 3.5 expõe valores sugeridos de L (m) para cada nível de estabilidade. Uma vez que a classificação de estabilidade pode variar com diversos fatores meteorológicos e o objetivo do trabalho é abranger condições médias, opta-se pelo comprimento de 1000000.

Tabela 3.5 – Valores sugeridos para o comprimento de Obukhov.

Estabilidade	Intervalo de valores	Valor sugerido
Muito instável	$-200 \leq L < 0$	-100
Instável	$-500 \leq L < -200$	-350
Neutra	$ L > 500$	1000000
Estável	$200 < L \leq 500$	350
Muito estável	$0 < L \leq 200$	100

Fonte: Adaptado de McGrattan et al., (2020b).

Outra grandeza que deve ser declarada para a prescrição do vento é o comprimento de rugosidade, que tem a função de caracterizar os obstáculos presentes no relevo analisado. A Tabela 3.6 apresenta uma parte das classificações de Davenport-Wieringa. Analisando o entorno do terreno onde está localizada a refinaria, é possível observar que a mesma se encontra em uma área afastada de grandes cidades, principalmente na direção em que incide o vento predominante. Dessa forma, adota-se o comprimento de rugosidade de 1 m.

Tabela 3.6 – Classificação de comprimentos de rugosidade.

z_0 (m)	Classificação	Panorama
0,1	Aproximadamente aberto	Plantações baixas e obstáculos ocasionais
0,25	Acidentado	Obstáculos dispersos como árvores
0,5	Muito acidentado	Aglomerados florestais, edifícios dispersos
1,0	Fechado	Subúrbios, aldeias, florestas
>2	Caótico	Grandes vilas e cidades, florestas irregulares

Fonte: Adaptado de McGrattan et al., (2020b).

3.5 Risco de efeito dominó

Sendo o principal objetivo do trabalho avaliar o potencial de efeito dominó decorrente de um incêndio em um dos tanques de armazenamento da refinaria, é fundamental observar a bibliografia existente sobre o tema. Uma série de estudos já foi realizada para determinar os valores mínimos de radiação térmica capazes de danificar outros tanques.

Nos estudos de Cozzani, Gubinelli e Salzano, (2006), foram calculadas as intensidades de radiação térmica decorrentes de incêndios em piscinas de 10 m a 50 m de diâmetro, compostas por acetona, benzeno, etanol e metanol. A partir desses fluxos, foram determinados os tempos para falha mecânica de tanques atmosféricos e pressurizados de diversas dimensões. Foi concluído que o aquecimento das paredes dos tanques, causado pelo calor radiante proveniente de uma fonte estacionária distante, pode provocar efeito dominó. Ainda segundo os autores, para todos os cenários considerados, o tempo de falha para os tanques é superior a 10 minutos para intensidades de radiação térmica menores do que 15 kW/m².

Landucci et al., (2009) utilizou um modelo de parâmetros concentrados para estimar o tempo para falha de tanques atmosféricos de diversos volumes, considerando fluxos de calor radiante constantes de diferentes intensidades. Através dos tempos de falha mais baixos para cada valor de radiação térmica, o autor define uma correlação de tempos mínimos de exposição capazes de causar falhas nos tanques. Essa correlação conservadora serve para fornecer o tempo mínimo de falha para qualquer cenário considerável.

Como a falha do tanque ocorre devido ao super aquecimento das paredes e esse é um processo lento, torna-se interessante considerar o tempo para mitigação efetiva do incêndio (atuação de sistemas de emergência e de equipes de combate às chamas). Através de tempos de mitigação típicos da experiência e da correlação definida anteriormente, Landucci et al., (2009) determina os fluxos de radiação térmica capazes de causar falhas. Dessa forma, foram identificados os limites mínimos de fluxos de calor que potencialmente podem acarretar em efeito dominó, tendo em vista o tempo de mitigação.

A Tabela 3.7 apresenta os resultados encontrados através da abordagem exposta. Conforme é possível observar, os limites de radiação térmica são fortemente dependentes do tempo de mitigação do incêndio. Quanto mais rápido é o início do combate às chamas, maior é a intensidade de radiação térmica necessária para causar danos aos demais tanques durante esse período. Do mesmo modo, quando mais lenta for a atuação contra o incêndio, menor é o limite com potencial de gerar efeito dominó.

Tabela 3.7 – Limites de radiação para efeito dominó.

Tempo máximo de mitigação eficaz (min)	Limite de radiação para tanques atmosféricos (kW/m ²)
10	15
15	13
30	10

Fonte: Adaptado de Landucci et al., (2009).

Com o objetivo de avaliar o pior cenário (maior tempo para mitigação), o presente trabalho considera o fluxo de 10 kW/m² como referência para o valor mínimo de radiação térmica capaz de danificar os tanques e potencialmente gerar um efeito dominó. Nas simulações, para realizar as medições de fluxo de calor radiante incidente nos tanques, são instalados sensores de *Incident Heat Flux* nas superfícies superiores e laterais dos reservatórios em que não ocorre o incêndio. Para otimizar o posicionamento de

múltiplos sensores, foi utilizada a prescrição de arranjos de dispositivos com distanciamento de 1,5 m. Como a chama demora alguns segundos para se desenvolver completamente, os dispositivos começam a registrar medições apenas a partir de 20 s de simulação.

No *Smokeview*, é possível observar quantidades de forma animada, através de arquivos de cortes, ou SLCF (*Slice File*), e de arquivos de fronteira, ou BNDF (*Boundary File*). Dessa forma, no arquivo de entrada do FDS, são prescritos SLCF de temperatura e velocidade no eixo y, posicionados no centro do incêndio, e BNDF de fluxo de radiação térmica incidente em todas as obstruções do domínio.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

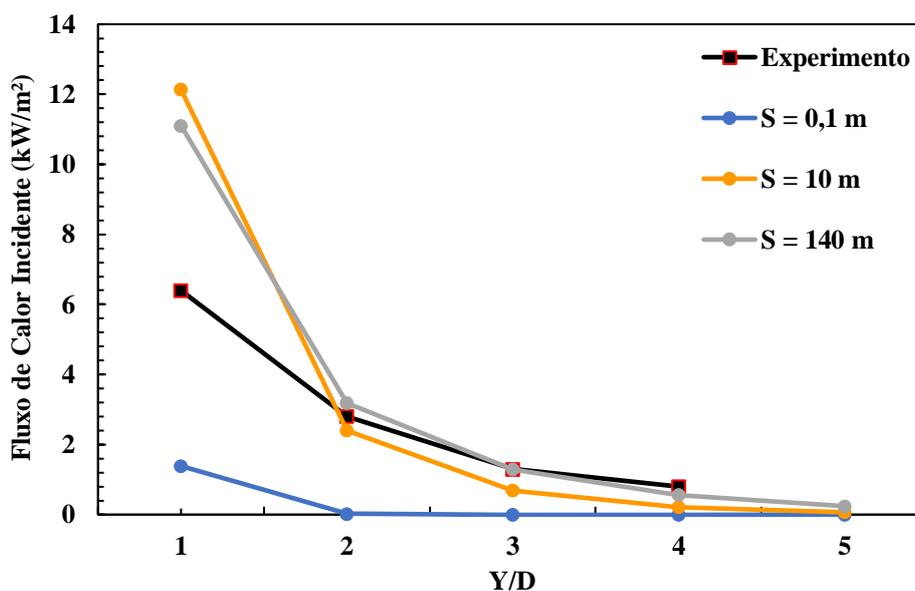
Na presente seção, é exposta a aplicação da metodologia através das simulações realizadas no software de CFD. Primeiramente é apresentada uma análise da influência do *path length* na determinação dos fluxos de radiação térmica incidente. Na sequência, são realizadas a validação dos resultados do FDS e a análise de malha para definir qual o comprimento de célula mais adequado para as simulações do trabalho. Posteriormente são avaliados três cenários de incêndio na refinaria, observando os fluxos de calor radiante nos tanques e o potencial de efeito dominó. Por fim, são estudadas duas alternativas para aumentar a segurança da planta.

4.1 A influência do *path length*

Conforme demonstrado na subseção 3.2, existem diferentes abordagens para a prescrição do *path length* (S) no FDS. Para avaliar cada uma delas, a simulação do experimento foi executada considerando três valores de S com uma malha de 200 cm. O primeiro valor, de 0,1 m, é referente ao padrão da versão utilizada do FDS. O segundo valor, de 10 m, é equivalente a cinco vezes o tamanho da célula. E o terceiro valor, de 140 m, é referente à abordagem proposta por Howell et al., (2021).

Os fluxos de radiação térmica incidente utilizados para análise são obtidos através da média dos valores medidos pelos sensores de 40 s a 300 s. Nesse intervalo, tanto a taxa de liberação de calor da chama quanto a emissão de radiação térmica são aproximadamente estáveis no tempo. Esse período é adotado em todas as demais simulações deste trabalho. Os resultados das medições em função da razão da distância horizontal (Y) e o diâmetro (D) a partir do centro do tanque de origem do fogo com cada um dos valores de S são apresentados na Figura 4.1.

Figura 4.1 – Fluxos de calor radiante incidente em função de Y/D para diferentes valores de S .



Fonte: Yamaguchi e Wakasa, (1986) e o Autor.

É possível observar que utilizando o valor de 0,1 m são obtidos os piores resultados em comparação ao experimento. Para todas as distâncias analisadas, as medições ficaram inferiores aos resultados experimentais. Apenas em $Y/D = 1$ foi verificado um fluxo de calor radiante superior a zero. Essa discrepância entre os resultados se deve ao fato de que o baixo valor do S não é adequado para a medição da radiação térmica em grandes distâncias, como é o caso do problema em questão.

Quando utilizado o $S = 10$ m - padrão de versão anterior do FDS - os resultados se tornam consideravelmente mais próximos dos dados experimentais para $Y/D = 2, 3$ e 4 , apontando que o comprimento mais elevado é adequado para essas distâncias. Por outro lado, para $Y/D = 1$, a medição do fluxo de calor radiante é superestimada em relação ao experimento.

Adotando a terceira abordagem, tem-se que, entre os valores analisados, o S mais adequado para as dimensões do domínio é de 140 m. Os resultados da simulação com esse valor apresentam boa correlação com o experimento para $Y/D = 2, 3$ e 4 . Porém, assim como ocorre com o valor anterior, para $Y/D = 1$, o FDS superestima o fluxo de radiação térmica. Como os melhores resultados foram obtidos com S de 140 m, esse valor é adotado para as demais simulações do presente trabalho.

4.2 Análise de malha e validação das simulações

Aplicando a metodologia para o cálculo do tamanho de malha em função da resolução, obtém-se os resultados apresentados na Tabela 4.1. Conhecendo o comprimento característico da malha, também é possível calcular o número total de volumes presentes no domínio computacional da simulação. Para mensurar a quantidade de memória RAM necessária para executar a simulação, pode-se tomar como referência aproximadamente 1 GB para cada 10^6 volumes.

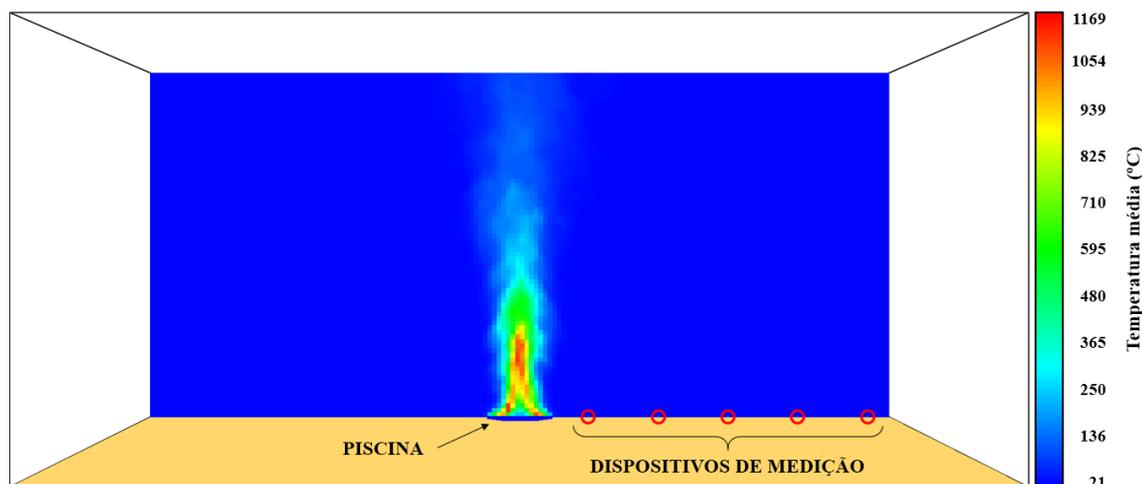
Tabela 4.1 – Tamanho da malha e número de volumes para cada resolução.

Resolução	Tamanho da malha (cm)	Número de volumes
4	500	122.880
10	200	1.920.000
16	125	7.864.320

Fonte: O Autor.

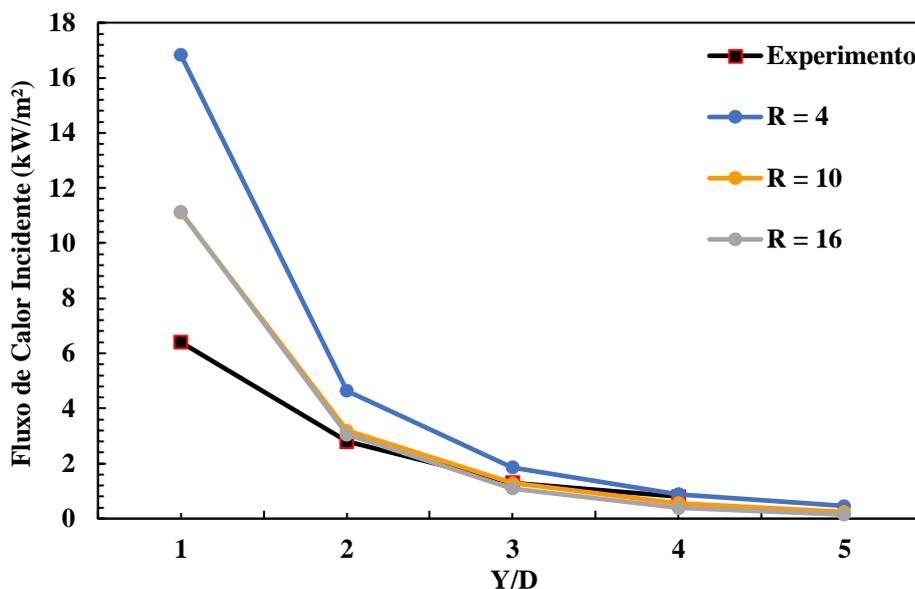
Conhecendo o comprimento da malha de cada resolução, simula-se o experimento para os três tamanhos distintos. A Figura 4.2 é uma imagem da simulação obtida através do *Smokeview* e apresenta a posição da piscina e dos sensores, bem como o corte longitudinal de temperatura média da chama. Os resultados dos fluxos de calor radiante a diferentes distâncias do centro da piscina para cada resolução são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.2 – Temperatura média para a simulação do experimento.



Fonte: O Autor.

Figura 4.3 – Fluxos de calor radiante incidente para diferentes resoluções de malha.



Fonte: Yamaguchi e Wakasa, (1986) e o Autor.

Para $R = 4$ os fluxos de calor radiativo são superestimados para as distâncias $Y/D = 1, 2$ e 3 , estando em concordância com os resultados experimentais apenas em $Y/D = 4$. Utilizando $R = 10$, as medições das simulações apresentam boa correlação com os dados experimentais para todas as distâncias, com exceção de $Y/D = 1$, onde o fluxo de radiação térmica persiste superestimado. Por fim, para $R = 16$, os resultados apresentam comportamento semelhante a $R = 10$, estando ligeiramente mais próximo do experimento para $Y/D = 2$ e mais distante em $Y/D = 3$ e 4 . Assim como para as demais resoluções, no último caso o fluxo de calor radiante também é superestimado para $Y/D = 1$. Como não houve mudança expressiva dos resultados de $R = 10$ para $R = 16$, não é necessário testar resoluções maiores. Nos estudos de Ahmadi et al., (2019), foram obtidos resultados semelhantes para a simulação do mesmo experimento.

No geral, os resultados das simulações indicam que, pelo menos para o modelo de radiação adotado, o FDS superestima os fluxos de radiação térmica para a distância de $Y/D = 1$. Para distâncias maiores, as simulações com $R = 10$ e $R = 16$ apresentaram boa correlação com os resultados experimentais. Uma vez que, na refinaria analisada, a distância entre o centro dos tanques e os costados dos tanques adjacentes são superiores a 1 diâmetro, as simulações apresentam resultados satisfatórios para a realização do trabalho. Como os resultados com a resolução intermediária ficaram mais próximos do experimento sem demandar o custo computacional do maior refinamento, $R = 10$ é adotado para as próximas análises.

4.3 Simulação de incêndio em tanque de armazenamento da refinaria

Conhecendo todos parâmetros de entrada necessários para as simulações, pode-se realizar o estudo de caso aplicado à refinaria. São simulados três cenários distintos e avaliados os fluxos de radiação térmica incidente em cada um dos tanques, exceto no tanque de número 5, onde ocorre o incêndio. Esse reservatório é selecionado para a queima por estar na posição mais crítica para emissão de calor radiante nos demais tanques. No primeiro cenário, a simulação é analisada sem a influência de vento. No segundo, é considerada a velocidade média dos ventos na região. No terceiro cenário, é utilizada a velocidade máxima média da região. Os ventos são assumidos com velocidade constante para todas as simulações do trabalho. A Tabela 4.2 apresenta o resumo das considerações de cada um dos cenários.

Tabela 4.2 – Considerações de cada cenário simulado.

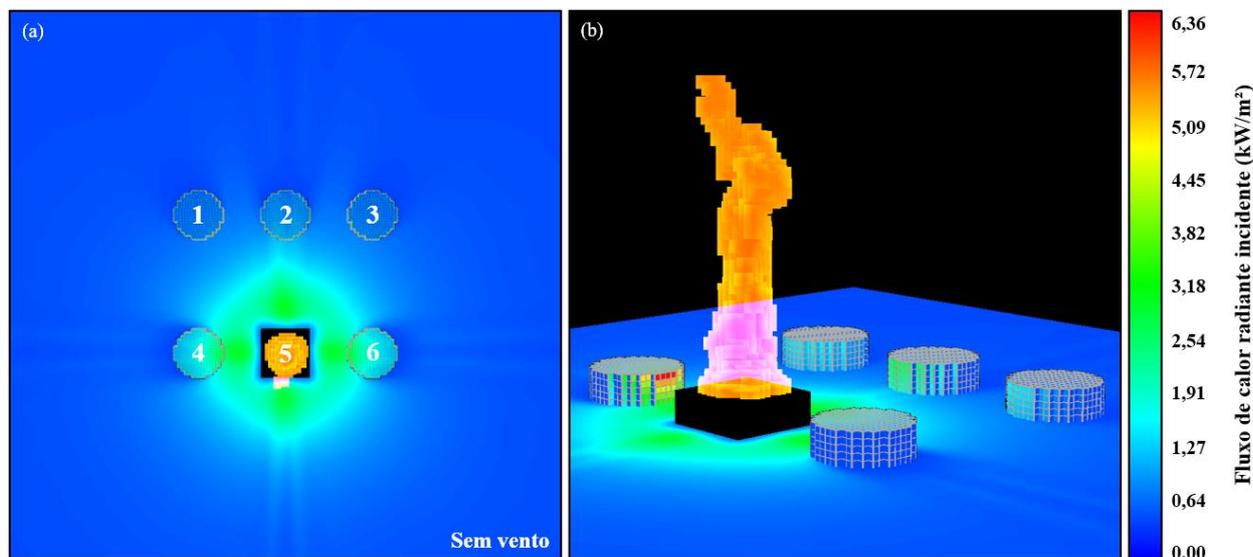
Cenário	Velocidade do vento (m/s)
1a	0,0
1b	2,9
1c	9,3

Fonte: O Autor.

Conforme citado na subseção 3.5, foram posicionados 774 sensores de radiação em cada um dos tanques, totalizando em 3870 medidores em cada uma das simulações. Devido à grande quantidade de dados, o suplemento Power Query do Microsoft Excel foi utilizado para transformação e carregamento dos arquivos CSV (valores separados por vírgulas). Posteriormente, para a análise e visualização dos dados, foi utilizado o Microsoft Excel.

Na Figura 4.4, são apresentadas duas imagens do *Smokeview* em um determinado instante de tempo da simulação do cenário 1a. Nessa imagem, é possível observar o fluxo de calor radiante incidente nas superfícies sólidas do domínio, com exceção do tanque em que ocorre o incêndio – a medição nessa obstrução é desligada para melhor visualização da escala. Acima desse tanque, ocorre a combustão e o desenvolvimento do fogo. A chama e os gases quentes produto da combustão são representados em três dimensões (3D) pelo realce dos volumes em que a temperatura é superior a 400 °C. Também é possível visualizar que, conforme abordado na subseção 3.4, o tanque em que ocorre o incêndio é prescrito como um prisma quadrilátero.

Figura 4.4 – Fluxo de calor radiante incidente para o cenário 1a em (a) vista superior e (b) vista aproximada em um instante de tempo da simulação.



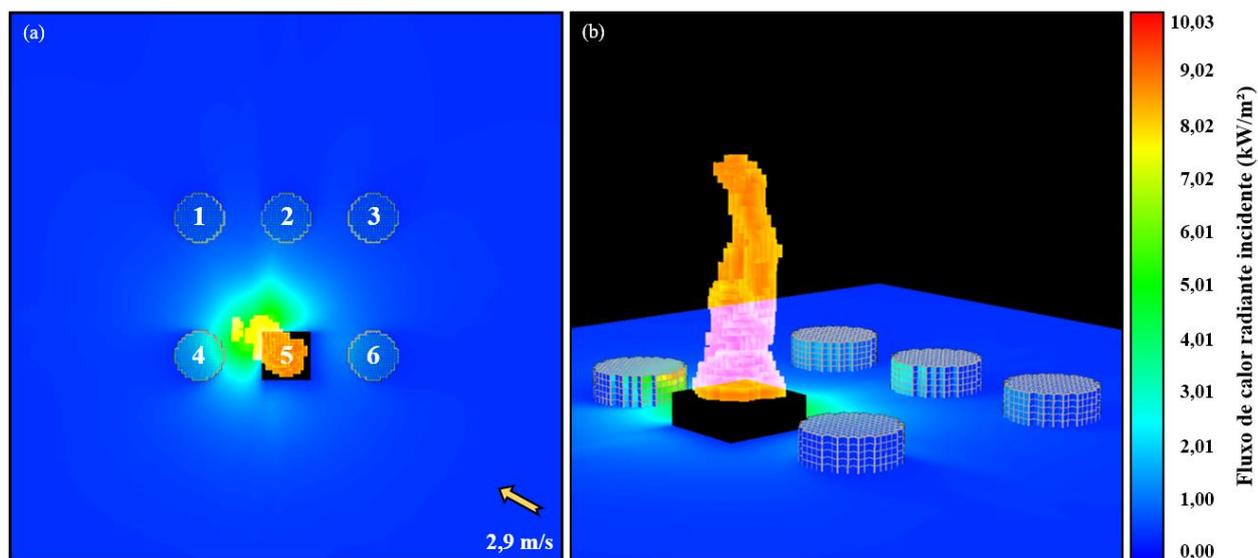
Fonte: O Autor.

No cenário 1a, a chama se desenvolve verticalmente, pois não há a influência de vento. Logo, como é esperado, o fluxo de calor radiante emitido pela chama é aproximadamente igual para todas as direções. Como é possível observar na Figura 4.4 (a), a radiação térmica incidente no chão não tem o mesmo valor em todas as direções. É inferior nos pontos próximos aos vértices do tanque, pois a obstrução não cilíndrica barra parcialmente o fluxo de calor radiante nessas regiões. A influência do formato do tanque não afeta significativamente as análises do trabalho, uma vez que o fluxo de radiação térmica incidente sobre os tanques adjacentes não sofre reduções significativas.

Os fluxos de calor radiante mais intensos ocorrem nas superfícies laterais dos tanques 4 e 6, como é possível observar na Figura 4.4 (b). Os fluxos de radiação térmica médios mais elevados são iguais em ambos os reservatórios e têm valor de 5,6 kW/m². Esses resultados estão de acordo com o esperado, uma vez que esses são os tanques mais próximos ao incêndio e encontram-se à mesma distância dele.

No cenário 1b, é prescrito o vento de direção predominante e velocidade média para o local da refinaria, conforme indicado pela seta na Figura 4.5 (a). Devido à influência do vento, é possível observar que o desenvolvimento da chama tende ao sentido do escoamento de ar. Por consequência, o fluxo de radiação térmica incidente também passa a ser mais intenso na direção para qual a chama se inclina. Conforme esperado, o maior fluxo de calor radiante médio, de $8,6 \text{ kW/m}^2$, ocorre no costado do tanque 4.

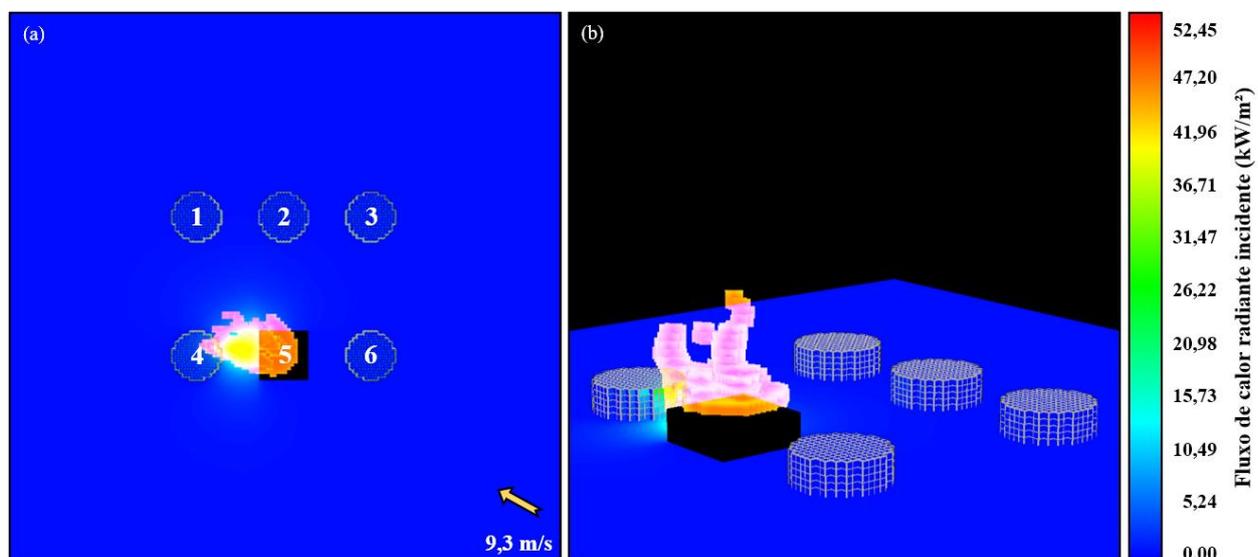
Figura 4.5 – Fluxo de calor radiante incidente para o cenário 1b em (a) vista superior e (b) vista aproximada em um instante de tempo da simulação.



Fonte: O Autor.

O vento de velocidade máxima média mensal de direção predominante para o local é prescrito no cenário 1c. Como é possível observar na Figura 4.6 (a) e (b), o escoamento de maior velocidade provoca uma inclinação mais acentuada da chama no sentido do vento. Em alguns instantes da simulação, os gases quentes e o fogo atingem o tanque 4. Por conta disso, o fluxo de radiação térmica incidente torna-se ainda mais concentrado e intenso nas superfícies próximas à chama. Para esse caso, o fluxo de calor incidente médio máximo na lateral do tanque 4 atinge o valor de $24,1 \text{ kW/m}^2$.

Figura 4.6 – Fluxo de calor radiante incidente para o cenário 1c em (a) vista superior e (b) vista aproximada em um instante de tempo da simulação.



Fonte: O Autor.

Os valores máximos dos fluxos de calor radiante médios em cada um dos reservatórios para os cenários 1a, 1b e 1c são apresentados na Tabela 4.3, sendo T1 o tanque 1, T2 o tanque 2, etc. Através da análise dos valores, é possível inferir que a incidência de vento e o aumento de sua velocidade causam um incremento no fluxo de radiação térmica que incide nos tanques de números 1 e 4. Para os reservatórios 3 e 6, o fluxo de calor tende a diminuir com a influência dos ventos, visto que há aumento na distância entre eles e o fogo.

Tabela 4.3 – Fluxos de calor radiante incidente médios máximos nos tanques em cada cenário.

Fluxo de calor radiante incidente (kW/m²)					
Cenário	T1	T2	T3	T4	T6
1a	1,4	2,4	1,4	5,6	5,6
1b	1,7	2,9	1,4	8,6	4,6
1c	1,9	2,3	1,1	24,1	2,4

Fonte: O Autor.

Conforme exposto na subseção 3.5, o fluxo de radiação térmica incidente de 10 kW/m² é adotado como valor mínimo com potencial de danificar e provocar efeito dominó. Analisando os resultados das medições das simulações, é possível verificar que, no cenário 1c, o fluxo de radiação incidente no tanque 4 atinge valores superiores ao dobro do limite mínimo considerado. De acordo com a análise da subseção 4.2, o FDS tende a superestimar a radiação térmica para distâncias de $Y/D = 1$. No cenário 1c, o espaçamento entre a chama e o costado do tanque 4 é inferior a esse valor, o que pode indicar a possibilidade de o fluxo de calor radiante medido pelo software estar incorreto. Em contrapartida, visto que em alguns instantes da simulação o fogo atinge o tanque adjacente, é razoável assumir que há risco de propagação do incêndio do tanque 5 para o tanque 4.

4.4 Alternativas para mitigação do risco de efeito dominó

Tendo em vista que a distribuição atual dos tanques na refinaria analisada pode possibilitar a propagação de incêndios entre tanques adjacentes, faz-se necessário o estudo de alternativas para mitigação do risco. São avaliadas duas abordagens distintas e analisados os fluxos de radiação térmica incidente nos tanques, conforme feito nos casos da seção anterior. É importante citar que as alternativas sugeridas nessa seção tratam-se de suposições sem análise de viabilidade técnica ou financeira para aplicação na planta real.

Na primeira alternativa, avaliada nos cenários 2a, 2b, 2c e 2d, barreiras são posicionadas entre os tanques adjacentes. Essa medida tem o objetivo de reduzir o fluxo de calor radiante que incide nos demais tanques caso ocorra um incêndio em um dos reservatórios. Para representar barreiras resistentes ao fogo e à radiação térmica, as obstruções são prescritas como paredes de 0,5 m de espessura de concreto com emissividade de 0,9. Como critério inicial para definição da altura das barreiras, assume-se que elas devem ser mais altas do que os tanques, que têm 10 m de altura. Nos cenários 2a a 2c, as barreiras tem altura de 12 m. No cenário 2d, acrescenta-se 1 m, resultando em paredes de 13 m de altura. Assim como na seção anterior, são avaliadas as três velocidades de vento. O resumo das considerações de cada cenário é apresentado na Tabela 4.4.

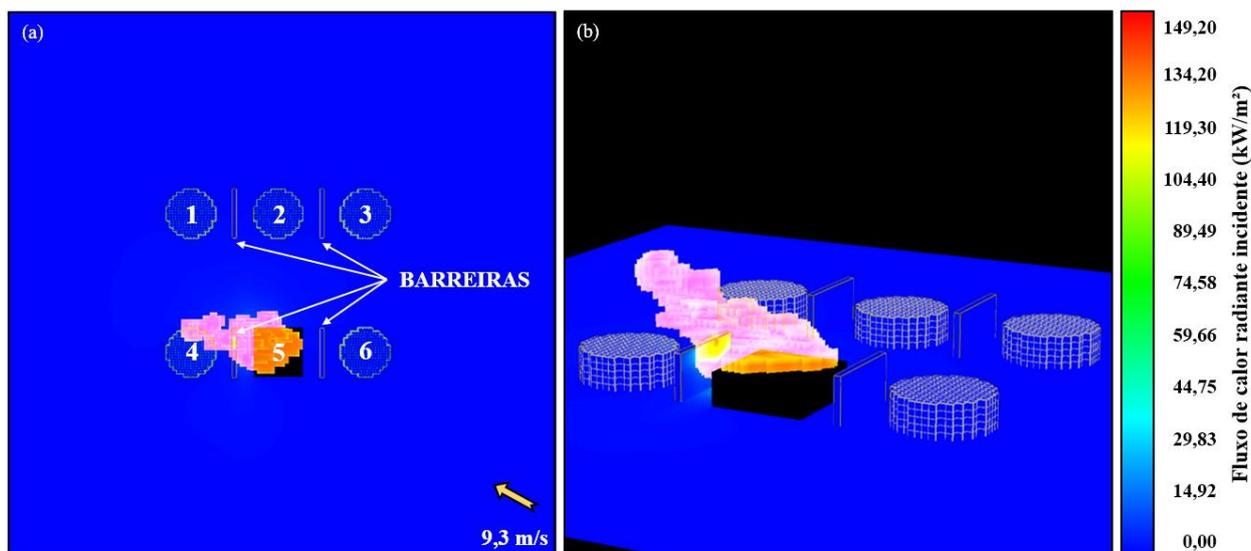
Tabela 4.4 – Considerações dos cenários 2a, 2b, 2c e 2d.

Cenário	Velocidade do vento (m/s)	Altura das barreiras
2a	0,0	12 m
2b	2,9	12 m
2c	9,3	12 m
2d	9,3	13 m

Fonte: O Autor.

Na Figura 4.7 (a) e (b), são apresentadas imagens da simulação do cenário 2d, onde estão indicadas as posições das barreiras no domínio. Conforme o objetivo inicial, a obstrução prescrita é capaz de barrar a inclinação da chama sobre o tanque 4. Ainda que haja fogo passando por cima da barreira, ela garante que a distância entre o fogo e o reservatório seja maior do que no cenário 1c. Como consequência, o fluxo de radiação térmica incidente sobre o tanque 4 é significativamente menor nos cenários 2a a 2d, quando comparados com o caso em que não há barreiras.

Figura 4.7 – Fluxo de calor radiante incidente para o cenário 2d em (a) vista superior e (b) vista aproximada em um instante de tempo da simulação.



Fonte: O Autor.

Os maiores fluxos de calor radiante incidente médios medidos em cada um dos tanques nos cenários 2a a 2d, são apresentados na Tabela 4.5. Analisando os valores, é possível observar que a parede de 12 m de altura é capaz de reduzir a incidência de radiação térmica nos tanques 4 e 6 em todos os cenários em comparação às simulações da seção anterior. Em T4, a atenuação do cenário 2c em relação ao cenário 1c é de 58,5%, resultando em um fluxo de calor no limite para risco de efeito dominó. Acrescentando 1 m de altura nas barreiras, o fluxo de radiação térmica médio máximo em T4 no cenário 2d reduz para 4,9 kW/m². Esse valor encontra-se 51% abaixo do limite de radiação térmica para efeito dominó, mostrando que a alternativa seria efetiva na mitigação do risco de propagação do incêndio.

Tabela 4.5 – Fluxos de calor radiante incidente médios máximos nos cenários 2a, 2b, 2c e 2d. Os desvios em relação aos cenários 1a, 1b e 1c (em %) são apresentados entre parênteses. O caso 2d é comparado ao cenário 1c.

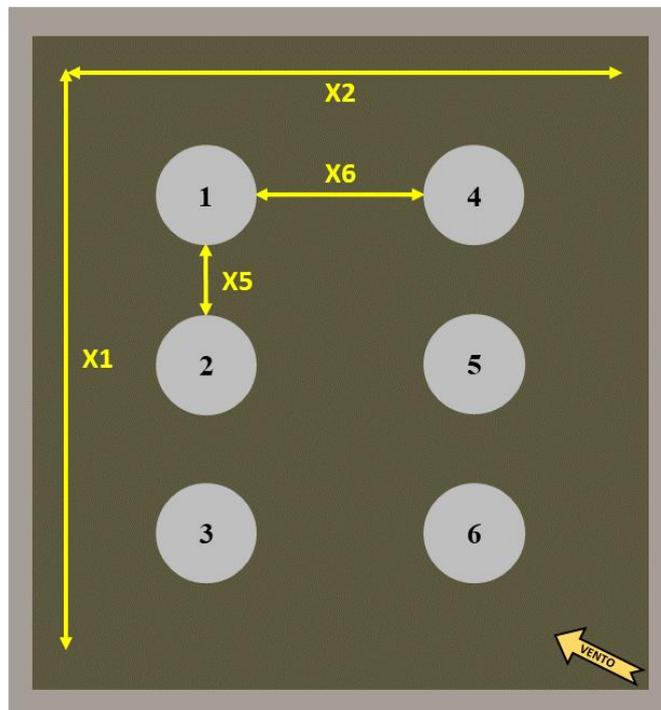
Fluxo de calor radiante incidente (kW/m ²)					
Cenário	T1	T2	T3	T4	T6
2a	1,4 (0,0)	2,5 (+4,2)	1,4 (0,0)	2,8 (-50,0)	2,8 (-50,0)
2b	1,8 (+5,9)	2,7 (-6,9)	1,3 (-7,1)	5,1 (-40,7)	1,6 (-65,2)
2c	1,8 (-5,3)	2,2 (-4,3)	1,0 (-9,1)	10,0 (-58,5)	0,9 (-62,5)
2d	1,6 (-15,8)	2,3 (0,0)	1,1 (0,0)	4,9 (-79,7)	0,8 (-66,7)

Fonte: O Autor.

Dado que a distância de separação entre os tanques é um fator importante na análise da incidência de radiação térmica, a segunda alternativa propõe um arranjo alternativo para o posicionamento dos reservatórios na refinaria. Considerando as mesmas dimensões do terreno da seção selecionada (X1 e X2), os tanques são distribuídos levando em conta a direção predominante do vento, a fim de mitigar os riscos de efeito dominó em caso de incêndio. Todavia, cabe salientar que o reposicionamento dos reservatórios

não leva em consideração limitações causadas por outras estruturas do local real, como a posição de linhas de dutos ou ruas. A Figura 4.8 exibe o arranjo alternativo dos tanques na refinaria e na Tabela 4.6 são apresentados os valores das novas dimensões de X5 e X6.

Figura 4.8 – Arranjo alternativo dos tanques na refinaria.



Fonte: O Autor.

Tabela 4.6 – Distâncias de separação do arranjo alternativo.

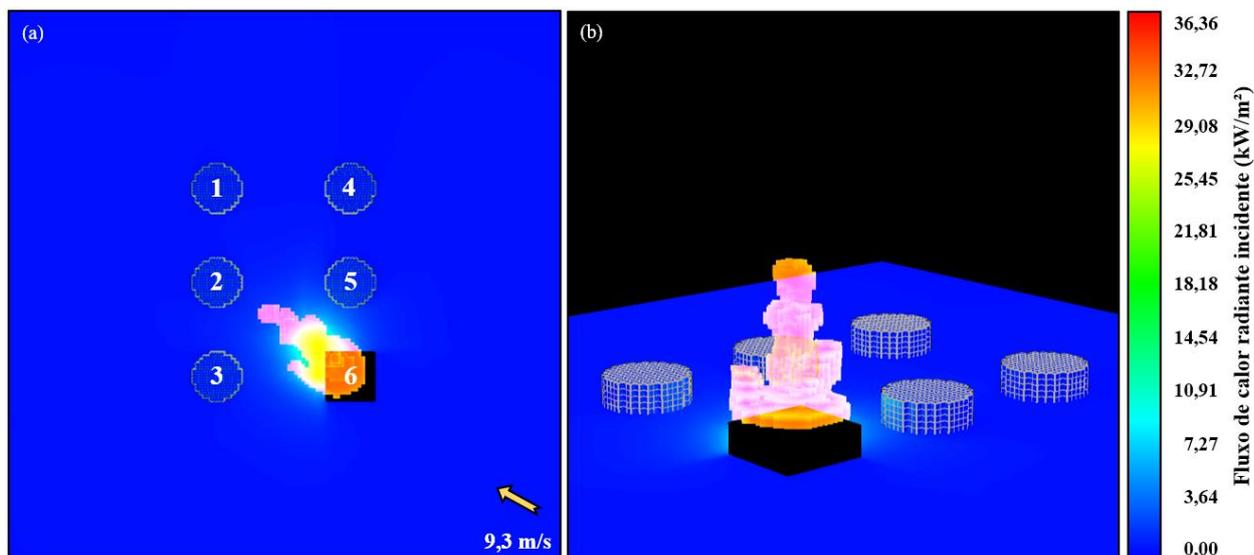
Parâmetro	Valor
X5 (m)	27
X6 (m)	49

Fonte: O Autor.

Segundo a NBR17505-2 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2015), o espaçamento mínimo entre os costados de tanques atmosféricos deve ser equivalente a 1/6 da soma dos diâmetros do tanque principal e do seu adjacente. Considerando os tanques de 27 m de diâmetro da refinaria em análise, a distância mínima seria de 9 m. Logo, tanto a dimensão X4, quanto a X5, satisfazem a exigência da norma.

Tal como nos casos anteriores, serão avaliadas as influências das três velocidades de vento nos cenários 3a, 3b e 3c. Entretanto, nessa situação, o incêndio ocorre no tanque de número 6. Na Figura 4.9 (a) e (b), são apresentadas as imagens da simulação do cenário 3c. É possível observar que o aumento do espaço horizontal entre os tanques adjacentes garante que seja mantida uma distância maior entre o fogo e os demais reservatórios, mesmo com a maior velocidade de vento prescrita. Diferente do que ocorre no cenário 1c, o fogo não atinge nenhum dos tanques durante o período da simulação.

Figura 4.9 – Fluxo de calor radiante incidente para o cenário 3c em (a) vista superior e (b) vista aproximada em um instante de tempo da simulação.



Fonte: O Autor.

Na Tabela 4.7, são apresentadas as máximas médias dos fluxos de calor radiante incidente em cada um dos tanques nos cenários 3a, 3b e 3c. Como esperado, o aumento da velocidade do vento causa o acréscimo da incidência de radiação térmica nos tanques 2 e 5. O valor mais crítico, de 6,6 kW/m², ocorre no costado do tanque 5 no cenário 3c e é 34% inferior ao limite mínimo para efeito dominó. Logo, o posicionamento alternativo dos tanques que considera a direção predominante do vento, também se mostra eficaz na mitigação do risco de propagação de incêndio.

Tabela 4.7 – Fluxos de calor radiante médios máximos nos cenários 3a, 3b e 3c.

Cenário	Fluxo de calor radiante (kW/m ²)				
	T1	T2	T3	T4	T5
3a	0,9	1,4	2,7	1,3	5,0
3b	1,0	1,8	3,5	1,3	6,2
3c	1,0	2,0	3,1	1,1	6,6

Fonte: O Autor.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho avalia o risco de propagação de incêndio em tanques atmosféricos de armazenamento de combustível de uma refinaria real. Com esse intuito, foi selecionado o software FDS para modelar e simular um incêndio em um dos reservatórios do local. Após a análise da influência do *path length* no cálculo da radiação térmica, foi realizado o estudo de sensibilidade de malha e a validação das simulações. Os resultados do FDS foram comparados com dados experimentais de fluxo de calor radiante emitido por um incêndio em uma piscina de querosene de 30 m de diâmetro. A validação mostra que, para as condições consideradas, o software superestima o fluxo de radiação térmica para distâncias próximas ao fogo, porém fornece resultados de acordo com o experimento para maiores distâncias.

Através de imagens de satélite, foi obtida a geometria da refinaria para modelagem no software. Três cenários foram simulados para avaliar a incidência de radiação térmica nos tanques em caso de incêndio em um dos reservatórios. No primeiro caso, não é considerada a influência do vento. No segundo e no terceiro cenários, são prescritos ventos de direção predominante da região com velocidades média e máxima mensal, respectivamente. Atentando ao limite de 10 kW/m² para o fluxo de calor radiante que

potencialmente pode causar efeito dominó, as simulações indicam que existe o risco de propagação do incêndio no terceiro cenário avaliado.

Levando em conta que o posicionamento atual dos tanques na refinaria pode ocasionar a propagação de incêndios, foram avaliadas duas abordagens passivas para mitigação do risco. No primeiro caso, são posicionadas barreiras entre os reservatórios em que foi observada a possibilidade de efeito dominó. Conforme indicado pelas simulações, paredes de concreto de 13 m de altura seriam capazes de reduzir o fluxo de radiação térmica para valores inferiores ao limite considerado em todos os cenários analisados. Portanto, a primeira alternativa se mostra eficaz na atenuação do risco de propagação do incêndio.

Na segunda abordagem, também passiva, é avaliado um posicionamento alternativo dos tanques dentro do mesmo terreno da refinaria, sendo este posicionamento dos tanques definido levando em conta a direção predominante do vento. Com o novo arranjo, não há risco de propagação de incêndios em nenhum dos cenários simulados. Isso mostra que, se a direção predominante do vento fosse considerada na construção da refinaria, os tanques poderiam estar posicionados de maneira diferente de como estão hoje. Tal mudança não se aplicaria apenas à seção analisada, mas a toda a fazenda de tanques. Dessa forma, toda a estrutura do local teria de ser repensada a fim de mitigar o risco de efeito dominó no caso de incêndio em um dos reservatórios.

O FDS se mostra uma ferramenta útil para análise de risco de propagação de incêndios em tanques de armazenamento de combustível. A possibilidade de simular cenários de grande escala sem custo computacional proibitivamente elevado torna-o uma opção interessante para a avaliação da segurança do distanciamento entre os reservatórios. A fim de obter resultados ainda mais confiáveis, trabalhos futuros poderiam analisar o desempenho de outros modelos para a determinação do coeficiente de absorção de radiação térmica, como o modelo da soma ponderada de gases cinza. Além disso, a modelagem dos tanques considerando sua composição física real, possibilitaria a avaliação do fluxo de calor radiante internamente. À vista disso, também seria exequível a análise do risco de ignição do combustível dentro do reservatório.

Sendo a tecnologia uma grande aliada para planejamento e desenvolvimento de projetos futuros de parques de tanques de armazenamento de combustíveis líquidos, como estudado nesse trabalho, infere-se que é fundamental aprofundamento acadêmico no assunto com intuito de auxiliar o entendimento e aplicação das ferramentas. Ao conciliar o conhecimento teórico ao prático, testando as mais diversas situações de um mesmo cenário, aumenta a possibilidade de resultados mais assertivos e com maior segurança para os profissionais do ramo e para a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMADI, O. et al. Consequence analysis of large-scale pool fire in oil storage terminal based on computational fluid dynamic (CFD). **Process Safety and Environmental Protection**, v. 123, p. 379–389, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR17505-2: Armazenamento de líquidos inflamáveis e combustíveis - Parte 2: Armazenamento em tanques, em vasos e em recipientes portáteis com capacidade superior a 3 000 L**. Rio de Janeiro, 2015.

BROWNELL, L.; YOUNG, E. **Process Equipment Design**. New York: John Willey & Sons Inc., 1968.

COELHO, P.; COSTA, M. **COMBUSTÃO**. 1ª ed. Alfragide: Edições Orion, 2007.

COZZANI, V.; GUBINELLI, G.; SALZANO, E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. **Journal of Hazardous Materials**, v. 129, n. 1–3, p. 1–21, 2006.

COZZANI, V.; TUGNOLI, A.; SALZANO, E. The development of an inherent safety approach to the prevention of domino accidents. **Accident Analysis and Prevention**, v. 41, n. 6, p. 1216–1227, 2009.

CURL, H.; DONNELL, K. O. **Chemical and Physical Properties of Refined Petroleum Products**. Boulder, 1977.

DEARDORFF, J. W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 18, n. 4, p. 495–527, 1980.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional 2021**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-601/topico-588/BEN_Síntese_2021_PT.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2022.

EXAME. **Ultracargo é multada em R\$ 22,5 milhões por incêndio**. Disponível em: <<https://exame.com/brasil/ultracargo-e-multada-em-r-22-5-milhoes-por-incendio/>>.

FRAGA, G. C. et al. Evaluation of different gray gas formulations against line-by-line calculations in two- and three-dimensional configurations for participating media composed by CO₂, H₂O and soot. **Fire Safety Journal**, v. 108, n. April, p. 102843, 2019.

GIL, R. **Incêndio na Ultracargo: uma tragédia anunciada**. Disponível em: <<https://www.apaest.org.br/index.php/imprensa/noticias/179-incendio-na-ultracargo-uma-tragedia-anunciada>>. Acesso em: 19 mar. 2022.

Google Earth. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

HOWELL, J. R. et al. **Thermal Radiation Heat Transfer**. 7. ed. Boca Raton: CRC Press, 2021.

HURLEY, M. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 5. ed. Greenbelt: Springer New York Heidelberg Dordrecht London, 2016. v. 1, 2, 3

INMET. **Banco Nacional de Dados Meteorológicos - BNDMET**. Disponível em: <<https://bndmet.inmet.gov.br/mapa>>. Acesso em: 24 mar. 2022.

LANDUCCI, G. et al. The assessment of the damage probability of storage tanks in domino events triggered by fire. **Accident Analysis and Prevention**, v. 41, n. 6, p. 1206–1215, 2009.

LIN, C. H. et al. Investigations on the characteristics of radiative heat transfer in liquid pool fires. **Fire Technology**, v. 46, n. 2, p. 321–345, 2010.

MAGNUSSEN, B. F.; HJERTAGER, B. H. On mathematical modeling of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion. **Symposium (International) on Combustion**, v. 16, n. 1, p. 719–729, 1 jan. 1977.

MASUM JUJULY, M. et al. LNG pool fire simulation for domino effect analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 143, p. 19–29, 2015.

MCGRATTAN, K. et al. Fire dynamics simulator Validation Guide : **NIST Special Publication 1018**, v. 3, 2006.

MCGRATTAN, K. et al. Fire Dynamics Simulator User's Guide. **national dynamic simulator -Technical reference guide**, p. 1–288, 2013.

MCGRATTAN, K. et al. Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model (Sixth Edition). **NIST Special Publication 1018**, v. 1, 2020a.

MCGRATTAN, K. et al. Sixth Edition Fire Dynamics Simulator User's Guide (FDS). **NIST Special Publication 1019**, v. Sixth Edit, 2020b.

MODEST, M. F.; HAWORTH, D. C. **Radiative Heat Transfer in Turbulent Combustion Systems Theory and Applications**. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, 2016.

PERSSON, H.; LÖNNERMARK, A. **Tank Fires Review of Fire Incidents 1951–2003SP Swedish National Testing and Research Institute**. SP Swedish National Testing and Research Institute, 2004.

RAITHBY, G. D.; CHUI, E. H. A Finite-Volume Method for Predicting a Radiant Heat Transfer in Enclosures With Participating Media. **Journal of Heat Transfer**, v. 112, n. 2, p. 415–423, 1 maio 1990.

RYDER, N. L. et al. Consequence modeling using the fire dynamics simulator. **Journal of Hazardous Materials**, v. 115, n. 1- 3 SPEC. ISS., p. 149–154, 2004.

SMAGORINSKY, J. GENERAL CIRCULATION EXPERIMENTS WITH THE PRIMITIVE EQUATIONS: I. THE BASIC EXPERIMENT. **Monthly Weather Review**, v. 91, n. 3, p. 99–164, 1963.

STROUP, D.; LINDEMAN, A. **Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications NUREG-1824**. Washington DC: NUREG-1824, 2013.

VASANTH, S. et al. Multiple pool fires: Occurrence, simulation, modeling and management. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 29, n. 1, p. 103–121, 2014.

VISKANTA, R.; MENGÜÇ, M. P. Radiation heat transfer in combustion systems. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 13, n. 2, p. 97–160, 1 jan. 1987.

YAMAGUCHI, T.; WAKASA, K. Oil Pool Fire Experiment. p. 911–918, 1986.