



RISCOS



MODELAGEM DE CENÁRIOS DE RISCOS E DESASTRES TECNOLÓGICOS
POR EXPLOSÃO DO CONDENSADO DE GÁS NATURAL*

MODELLING SCENARIOS OF TECHNOLOGICAL RISKS AND DISASTERS
DUE TO NATURAL GAS CONDENSATE EXPLOSION

21

Crislane Santos Nascimento

Universidade do Estado da Bahia (Brasil)
Departamento de Ciências Exatas e da Terra II
crislanesn@gmail.com

Alarcon Matos de Oliveira

Universidade do Estado da Bahia (Brasil)
Departamento de Ciências Exatas e da Terra II
ORCID 0000-0001-8106-285X almoliveira@uneb.br

RESUMO

As transformações na sociedade após a Revolução Industrial impulsionaram a economia global, especialmente no setor petrolífero, que viu um significativo crescimento com o aumento da utilização do gás natural desde a década de 70 do século passado. Atividades industriais envolvendo o manuseio do gás líquido podem resultar em desastres tecnológicos conhecidos como *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE). A modelagem computacional é uma ferramenta essencial para identificar o alcance potencial desses desastres, contribuindo para treinamentos de emergência e gerenciamento ambiental. Este estudo teve como objetivo simular a explosão do condensado de gás natural armazenado em um vaso de pressão industrial contendo aproximadamente 37 m³ de gás. Utilizou-se o método dedutivo, levantando dados geográficos e climáticos e estabelecendo cenários de risco modelados na versão 5.4.7 do software *Areal Locations of Hazardous Atmospheres* (ALOHA). Os resultados indicam que, em todas as análises, os raios de explosão foram superiores a um quilômetro, abrangendo uma zona potencialmente letal, incluindo as instalações do vaso de pressão e o ecossistema circundante. Apesar das limitações da plataforma, o ALOHA permitiu uma prévia análise das consequências do BLEVE.

Palavras-chave: Desastres tecnológicos, BLEVE, ALOHA.

ABSTRACT

The changes in society following the Industrial Revolution have driven the global economy, particularly in the oil sector, which has seen significant growth with the increased use of natural gas since the 1970s. Industrial activities involving the handling of liquid gas can result in technological disasters known as boiling liquid expanding vapour explosions (BLEVEs). Computational modelling is an essential tool for identifying the potential scope of these disasters, contributing to emergency training and environmental management. This study aimed to simulate the explosion of natural gas condensate stored in an industrial pressure vessel containing approximately 37 m³ of gas. The deductive method was used, gathering geographic and climatic data and establishing risk scenarios modelled in version 5.4.7 of the *Areal Locations of Hazardous Atmospheres* (ALOHA) software. The results indicate that, in all analyses, the explosion radii were greater than one kilometre, covering a potentially lethal zone, including the pressure vessel facilities and the surrounding ecosystem. Despite the limitations of the platform, ALOHA made a preliminary analysis of the consequences of BLEVEs possible.

Keywords: Technological disasters, BLEVE, ALOHA.

* O texto deste artigo corresponde a uma comunicação apresentado no VI Congresso Internacional de Riscos, tendo sido submetido em 19-09-2023, sujeito a revisão por pares a 17-11-2023 e aceite para publicação em 30-04-2024. Este artigo é parte integrante da Revista *Territorium*, n.º 32 (II), 2025, © Riscos, ISSN: 0872-8941.

Introdução

A utilização dos recursos naturais vem gerando diversas preocupações ambientais, a dinâmica de consumo capitalista intensificado desde a Revolução Industrial vem aumentando as preocupações ambientais. Os avanços da indústria e da urbanização em escala planetária transformou a economia mundial, porém alavancou também o lançamento de poluentes no meio ambiente, a geração de resíduos sólidos e efluentes e a probabilidade de acidentes químicos (Leal *et al.*, 2008; Alcantara, 2012). Com o desenvolvimento acelerado da tecnologia, o nível de complexidade industrial aumentou a partir de 1950, consecutivamente a escala de eventos de perdas, bem como o raio de alcance, podendo afetar não somente as instalações industriais (funcionários) mas também a população no seu entorno (Cameron e Ramos, 2005). Podemos destacar os acidentes industriais ocorridos em Flixborough, na Inglaterra em 1974 (acidentes químicos), Three Mile Island no ano de 1979 e Chernobyl em 1986 na geração de energia nuclear, na Cidade do México 1984 a explosão de gás, acarretando a perda de centenas de vidas (Cameron e Ramos, 2005).

Desde a revolução industrial, os combustíveis fósseis são a principal fonte de energia primária. Apesar dos benefícios econômicos, a utilização desses combustíveis pode causar alterações no meio ambiente. Além da intensificação do efeito estufa, de acordo Moreira e d'Almeida (2018), o risco de graves incidentes, como explosões, derramamentos, incêndios e guerras, é inerente, já que se trata de combustíveis inflamáveis, contaminantes e de alto valor comercial. Tanto o petróleo quanto o gás natural são combustíveis fósseis caracterizados como recursos naturais não renováveis. Estes recursos são assim conhecidos por seu processo de formação ser longo, podendo levar milhões de anos e suas reservas serem finitas devido, principalmente, à alta taxa de consumo e à baixa capacidade de regeneração (Moreira; D'Almeida, 2018).

A indústria de petróleo e gás, apesar de está ligada diretamente com a fabricação de diversos produtos como plástico, calçados e cosméticos e ter papel fundamental na produção de energia global e na economia brasileira, possui alto potencial de aspectos e impactos ambientais tendo capacidade de comprometer a qualidade do solo e da água e trazer danos à saúde dos seres vivos (Martins *et al.*, 2015). Santos (2012), dentre os problemas ambientais relacionados a esta atividade destaca, principalmente, a ocorrência de vazamentos que provocam alterações nos ecossistemas costeiros e terrestres e podem culminar em explosões.

A utilização do gás natural (GN) como recurso energético aumentou, principalmente, desde a crise do petróleo na década de 70, caracterizada pela elevação dos preços

provocada pela Organização dos Países Exportadores do Petróleo (OPEP). A partir de então, atrelado às questões ambientais e ao objetivo de diminuir a vulnerabilidade dos países associada à oferta de petróleo, a busca pela diversificação dos suprimentos de energia vem provocando o crescimento do uso do GN (Fioreze *et al.*, 2013). No processo de diversificação da matriz energética mundial, o GN é considerado o combustível de transição até ao desenvolvimento e expansão das alternativas tecnológicas de baixo impacto ambiental, isto porque, dentre os combustíveis fósseis, o gás é considerado o mais limpo, pois gera menos poluentes atmosféricos e o dióxido de carbono (CO₂) produzido por unidade de energia é inferior aos demais (Cordeiro, 2017; Fioreze *et al.*, 2013; Braga *et al.*, 2005).

Conforme a ANP (2020), nas bacias sedimentares, o gás pode ocorrer dissolvido no petróleo ou sob a forma de uma capa de gás, sendo denominado gás associado, ou pode ocorrer livre de petróleo ou em pequenas quantidades deste componente, sendo chamado gás não associado. O gás também pode ser classificado quanto à existência de fases: gás seco e gás úmido. O gás seco é todo hidrocarboneto ou mistura dele que permanece integralmente na fase gasosa em quaisquer condições, tanto no reservatório quanto na superfície. O gás úmido, ou gás condensado, é todo hidrocarboneto que se encontra originalmente na forma gasosa e que venha apresentar a formação líquida dependendo das condições do reservatório ou na superfície. O condensado de gás é formado majoritariamente por hidrocarbonetos líquidos com mais de cinco átomos de carbono (C₅+). De forma geral, o gás condensado é uma mistura de substâncias inflamáveis e prejudiciais ao meio ambiente, aos animais e aos seres humanos (Montenegro; Pan, 2000; Talavera *et al.*, 2002; Souza, 2017).

Os acidentes químicos representam um risco inerente às indústrias que lidam com substâncias perigosas em seus processos. Estes eventos trágicos são um lembrete dos perigos associados a essas atividades industriais e destacam a importância da segurança e do gerenciamento adequado de produtos químicos perigosos. Um exemplo marcante foi a explosão do gasoduto de gás natural da Pacific Gas and Electric Company em San Bruno, Califórnia, em 2010. Essa explosão resultou em oito mortes, além de ferimentos em várias pessoas e a destruição de várias casas. Outro incidente significativo ocorreu em 2004, na Bélgica, quando uma explosão em uma instalação de distribuição de gás natural em Ghislenghien resultou em 24 mortes e mais de 130 feridos. Em 2014, uma série de explosões causadas por vazamentos de gás natural em tubulações subterrâneas em Kaohsiung, Taiwan, resultou em pelo menos 32 mortes e mais de 300 feridos. Esses acidentes destacam a necessidade contínua de vigilância e precaução na indústria química para prevenir tragédias semelhantes no futuro.

Os danos gerados com a ocorrência do acidente podem atingir o meio ambiente e a população ao redor das instalações dessas fábricas. As indústrias de petróleo, além de possuírem grande potencial degradador do meio ambiente, apresentam dificuldades em como prever e mensurar muitos desastres tecnológicos que podem afetar vidas e patrimônios (Mariano, 2001).

De acordo com Ardito (2020), os desastres podem ser diferenciados por sua origem dividindo-se em naturais, tecnológicos e mistos. Lopes (2017) e Ardito (2020) explicam que os naturais são oriundos dos fenômenos da natureza que podem causar danos materiais, econômicos, sociais e ambientais como inundações, terremotos, secas, ciclones tropicais, nevascas, incêndios florestais, tsunamis, atividades vulcânicas, deslizamentos de terra, entre outros. Os tecnológicos são provenientes das falhas de infraestrutura e da ação humana como rompimento de barragens, atividades nucleares e radioativas, rejeitos tóxicos, acidentes industriais. Os mistos ocorrem quando um desastre natural pode desencadear um desastre tecnológico, ou inverso quando um desastre tecnológico desencadeia desastre natural, como foi o caso do rompimento da barragem de Brumadinho.

A ocorrência do vazamento do condensado de gás natural pode trazer diversos danos ao meio ambiente e, a depender da sua escala, ocasionar uma explosão conhecida como *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE). Sua tradução quer dizer Explosão do Vapor Expandido pelo Líquido em Ebulição. Para o estudo e determinação destes cenários mais críticos, os modelos computacionais são ferramentas que auxiliam na análise do comportamento da radiação térmica destas explosões e no gerenciamento ambiental de áreas impactadas (Lopes *et al.*, 2016).

O *software* ALOHA (*Areal Locations of Hazardous Atmospheres*), desenvolvido pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e pela *Environmental Protection Agency* - EPA, é adequado para estimar a extensão e concentração de plumas para acidentes químicos, o que auxilia no planejamento e treinamento em emergências, com capacidade para estimar os perigos associados a cenários acidentais envolvendo combustão de líquidos e gases (Chakraborty e Armstrong, 1996, Jones *et al.*, 2013, Júnior *et al.*, 2015; Lopes *et al.*, 2016).

Este artigo buscou identificar e quantificar os possíveis alcances da explosão do condensado de gás natural em uma Estação de Gás Natural Não Associado (EGNA) no estado da Bahia, utilizando o *software* ALOHA. Optou-se pelo uso do *software* ALOHA devido à sua natureza de código aberto, o que permite uma maior transparência e flexibilidade em termos de personalização e adaptação às necessidades específicas da pesquisa. Essa escolha também contribui para reduzir custos, uma vez que

o *software* livre geralmente não requer pagamento de licenças, tornando-o uma opção acessível para pesquisadores e instituições com recursos limitados. Dessa forma, o uso de *software* livre como o ALOHA não apenas atende às necessidades técnicas da pesquisa, mas também está alinhado com valores de transparência, acessibilidade e colaboração na ciência.

Materiais e métodos

Área de estudo

A EGNA em estudo está localizada no município de Alagoinhas-BA. O município está distante 124 km da capital baiana, Salvador, e, segundo dados do IBGE (2021), O município tem uma extensão territorial de 707,835 km² e limita-se com os municípios de Inhambupe (ao norte), Catu e Araçás (ao sul), Entre Rios e Araçás (leste) e Teodoro Sampaio e Aramari (oeste) A região possui um clima do tipo úmido a subúmido com pluviosidade média anual de 1.469mm. Segundo dados do INMET, os meses com menor plusviosidade são dezembro, janeiro e fevereiro, com chuvas no entorno de 60 a 90 mm, o período chuvoso começa em maio e finaliza em julho com pluviosidade variando entre 120 a 1800mm (Gonçalves *et al.*, 2005). A temperatura média de 24,5°C, sendo a máxima de 33,1°C, os meses mais quentes são janeiro e fevereiro, a mínima de 17,8°C sendo o mês mais frio agosto. Os ventos predominantes de Este e Sudeste, bastantes influenciados pela dinâmica da Temperatura da Superfície Marítima -TSM, em especial o oceano Atlântico, pela Zona de Convergência Itertropical - ZCIT e pelos alísios de sudeste (Ferreira e Melo, 2005). Diante desses dados, podemos classificar climaticamente Alagoinhas, de acordo com Köpen, como Af, Clima tropical úmido ou superúmido, sem estação seca, com temperatura média no mês mais quente superior a 18°C (Gonçalves *et al.*, 2005).

A área de estudo está inserida dentro do Domínio da Mata Atlântica, ocorrendo dois tipos de formações florestais, a saber Floresta Ombrófila Densa e Floresta Estacional Semidecidual, observa-se um mosaico dos tipos vegetacionais citados, incluindo áreas de transição com formações savânicas (Savana) (Nunes e Matos, 2021). A região é caracterizada pelo elevado grau de endemismo, para alguns grupos, possuindo vegetação peculiar, que protege nascentes importantes que abastecem diversos municípios, incluindo Salvador (Nunes e Matos, 2021). Além disso, existe no entorno da EGNA a silvicultura do Eucalipto este setor produtivo é responsável 06 % do PIB do Estado (ABAF, 2023). Ressalta-se que no entorno do tanque não existem, cidades ou povoados próximos.

A área onde se localiza a EGNA é formada por um conjunto de poços produtores de gás não associado que é transportado através de linhas de aço de quatro polegadas

de diâmetro (aproximadamente 0,1 metros) direcionadas para a Estação. As linhas de produção operam com uma pressão em torno de 49,78 a 99,56 libras por polegada quadrada (psi) e temperatura de 30 °C (Operadora B, 2021a). Um psi é equivalente a 6894,76 pascais.

Na Estação, os processos operacionais são a coleta, separação primária gás/líquido e o escoamento do gás não associado. A capacidade de processamento é definida pelo potencial de produção dos poços. Entre outubro de 2021 e março de 2022, a produção do condensado encontrou-se em média de 1,4 metros cúbicos por dia. (Operadora B, 2021b; Operadora B, 2022b). Dentro da EGNA, o condensado gerado diariamente é drenado para um vaso acumulador vertical (fot. 1), com 10 metros de altura e raio 1,5 mantido sob temperatura de 30°C e pressão máxima de trabalho admissível de 49,78 psi (Operadora B, 2021a).



Fot. 1 - Vaso acumulador de condensado

(Fotografia do arquivo dos autores, tirada em 25/04/2022).

Photo 1- Condensate Accumulator Vessel

(Photograph from the authors' archive, taken in 25/04/2022)

Etapas para simulações

Para realizar a simulação dos possíveis cenários de explosão do condensado de gás natural não associado foi utilizado o programa computacional de modelagem de fluxo de gases *Areal Locations of Hazardous Atmospheres* - ALOHA, versão 5.4.7. O desenvolvimento do trabalho se deu a partir das seguintes etapas:

- Obtenção das coordenadas métricas no sistema de referência SIRGAS 2000, zona UTM 24S, e da elevação do terreno da área de localização da EGNA em estudo através de GPS (*Global Positioning System*) portátil. O modelo do GPS utilizado foi o Garmin eTrex 10;
- Para o levantamento dos parâmetros meteorológicos necessários para o modelo foram utilizadas as Normais Climatológicas do Brasil de 1991 a 2020 referentes ao estado da Bahia (INMET, 2022). As variáveis analisadas foram temperatura, umidade, velocidade e direção do vento e cobertura das nuvens;

- Inserção de informações de localização, dados atmosféricos, volume do vaso acumulador e especificação do contaminante a ser analisado (dados químicos) no software ALOHA. Conforme (OPERADORA B, 2022a), este vaso possui capacidade volumétrica de 61,530 metros cúbicos e altura de 10 metros. Dentro do processo de produção, quando esse alcança entre 50 a 60 % do seu volume, é solicitado transporte para realizar destinação do fluido. Logo, com o intuito de considerar cenários de maior potencial de risco, foi adotado o percentual de 60 % de gás condensado dentro do vaso de pressão. A substância de referência para a simulação foi a de maior proporção na cromatografia do fluido obtido por análise laboratorial, o undecano ($C_{11}H_{24}$);
- Geração das simulações de explosão considerando os cenários apresentados no QUADRO I.

QUADRO I - Dados de entrada da simulação, condição de contorno.

Legenda: N - nublado; PN - parcialmente nublado;
E - ensolarado; ESE - leste-sudeste.

TABLE I - Simulation input data, boundary condition.

Legend: N - cloudy; PN - partly cloudy; E - sunny;
ESE - east-southeast.

Dados de entrada	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Temperatura	25 °C	29 °C	33 °C
Umidade do ar	65 %	35 %	5 %
Velocidade do vento	2,8 m/s	3,8 m/s	5 m/s
Direção do vento	ESE	ESE	ESE
Cobertura de nuvem	N	PN	E
Agente químico no vaso	60 %	60 %	60 %

Para simular a explosão do condensado de gás, construímos um cenário hipotético cuja as variáveis climáticas são os valores médios da normal climatológica. E na plataforma, a umidade varia entre 5 % (totalmente seco) a 99 % (molhado). Na proposição dos cenários, buscou-se a passagem por esta faixa desde o cenário crítico (3) até o mais próximo do limite superior relacionando com a realidade climática da região de estudo. A fig. 1 demonstra os dados de entradas para simulação do cenário 1.

```

SITE DATA:
Location: ALAGOINHAS, BRAZIL
Building Air Exchanges Per Hour: 0.59 (unsheltered single storied)
Time: April 23, 2022 2:00 hours ET (using computer's clock)

CHEMICAL DATA:
Chemical Name: UNDECANE
CAS Number: 1120-21-4 Molecular Weight: 156.31 g/mol
PAC-1: 2.3 ppm PAC-2: 26 ppm PAC-3: 150 ppm
LEL: 7000 ppm UEL: 51000 ppm
Ambient Boiling Point: 194.77 °C
Vapor Pressure at Ambient Temperature: 5.49e-004 atm
Ambient Saturation Concentration: 567 ppm or 0.057%

ATMOSPHERIC DATA: (MANUAL INPUT OF DATA)
Winds: 2.8 meters/second from ESE at 3 meters
Ground Roughness: urban or forest Cloud Cover: 3 tenths
Air Temperature: 25 °C Stability Class: D
No Inversion Height Relative Humidity: 65%

SOURCE STRENGTH:
SLIPE of flammable liquid in vertical cylindrical tank
Tank Diameter: 2.10 meters Tank Length: 10 meters
Tank Volume: 41.530 cubic meters
Tank contains liquid
Internal Storage Temperature: 25 °C
Chemical Mass in Tank: 27,230 kilograms
Tank is 60% full
Internal Temperature at Failure: 230 °C

```

Fig. 1 - Dados de entrada para o cenário 1.

Fig. 1 - Input data for Scenario 1.

Utilização do software *Google Earth Pro* desenvolvido e distribuído pelo Google cuja finalidade é apresentar um modelo tridimensional do globo terrestre. Com este, a observação dos resultados ficará mais compreensível a partir da representação das distâncias das explosões obtidas nas simulações do ALOHA

Modelagem de explosão no software ALOHA

O software ALOHA emprega modelos de chama sólida para calcular os riscos de radiação térmica de explosões e incêndios, segundo esse princípio, o modelo simula o formato da chama utilizando geometria simples, como um cilindro ou cone (Zhou e Wang, 2019). O fluxo de radiação emitido da superfície da chama e a que incide sobre um alvo distante é calculada pela Equação 1 (Jones *et al.*, 2013; Belloví e Sierra, 2018; Zhou e Wang, 2019).

$$q = E \cdot F \cdot \tau$$

Onde: q é radiação térmica incidente em uma superfície vertical em quilowatts por metro quadrado (kW/m²); F é o fator de vista geométrica, ou seja a relação entre a energia de radiação recebida pela energia de radiação emitida, por unidade de área; τ é o coeficiente de transmissão atmosférica; E é a intensidade média de radiação (kW/m²).

AIChE (1984) define 350 kW/m² para um fluxo de energia emissiva razoável para grandes bolas de fogo envolvendo combustíveis de hidrocarbonetos. A plataforma ajusta esse valor multiplicando a razão do calor de combustão do produto químico (Δh_c) dividido pelo calor de combustão do propano ($\Delta h_{c, \text{propano}}$), ambos em J/kg, de acordo a Equação 2 (Jones *et al.*, 2013).

$$E = 350 \left(\frac{\Delta h_c}{\Delta h_{c, \text{propano}}} \right)$$

O fator de visão geométrica é uma função do tamanho da bola de fogo e da distância entre esta e um receptor. O tamanho depende da quantidade de combustível que contribui para a explosão (Jones *et al.*, 2013; Belloví e Sierra, 2018). Para calcular o valor de F, o ALOHA utiliza a Equação 3 estabelecida pela AIChE (1984).

$$F = \frac{x(D_{\max}/2)^2}{x^2 + (D_{\max}/2)^2} \text{ para } x > (D_{\max}/2)$$

Onde D_{\max} é o diâmetro máximo da bola de fogo e o termo x é a distância entre seu centro e o corpo irradiado. Para encontrar este diâmetro, em metros (m), a plataforma utiliza a Equação 4 formulada por (Roberts, 1981).

$$D_{\max}(m) = 5,8 \cdot \text{massa}^3(Kg)$$

De acordo Jones *et al.* (2013), a transmissividade da atmosfera à radiação térmica, depende da distância entre as superfícies emissora e receptora, x. É sensível à

neblina, chuva, fumaça, dióxido de carbono e vapor de água na atmosfera. O ALOHA conta apenas com vapor de água. Por não considerar os outros fatores, a plataforma superestima a radiação transmitida nos casos em que ocorrem os outros fenômenos atenuantes. O coeficiente de transmissão atmosférica é função da umidade relativa do ar e da distância até o ponto em questão, conforme a Equação 5 formulada por Cook e Whitehouse (1990).

$$\tau = 1,389 - 0,135 \log_{10}(P_w \cdot x)$$

Sendo P_w a pressão parcial da água na atmosfera. A Equação 6 demonstra a expressão matemática para a P_w , dada por Thibodeaux (1990).

$$p_w = 99,89 \frac{R_H}{100} \exp \left(21,66 - \frac{5431,3}{T_a} \right)$$

Referencial teórico

Riscos e desastres tecnológicos: indústria de petróleo e gás

Franco e Druck (1998) relatam a relação intrínseca entre riscos industriais, meio ambiente e saúde das populações associando como nas sociedades contemporâneas ramos industriais poluentes a exemplo do petroquímico, químico e nuclear têm ganhado mais enfoque nas discussões sobre os riscos potenciais dessas atividades. Por conseguinte, (Lopes, 2017) expõe um desastre como evento que repercute negativamente no desenvolvimento econômico, na medida em que causa perda de vidas humanas, danos às pessoas, destruição total ou parcial a moradias, fontes de sustento, a infraestrutura produtiva e de serviços e ao meio ambiente.

Mendonça (2009) define risco como a probabilidade de ocorrência de um dano, além disso podemos acrescentar que riscos é estimado em função do produto entre probabilidade e suas consequências, para a uma determinada sociedade, sejam perdas de vidas, danos ambientais e materiais. O autor também aborda o risco de desastre tecnológico composto essencialmente por acidentes industriais, radioativos e de transportes. As discussões envolvendo esses eventos têm sido intensificadas ao longo dos anos devido a acontecimentos drásticos com repercussão internacional que alertaram para a importância do conhecimento e gerenciamento dos riscos inerentes as atividades industriais tanto para a sociedade quanto para o meio ambiente (Pereira e Quelhas, 2010; Lopes, 2017).

Conforme Freitas *et al.* (1995) os acidentes industriais referem-se aos eventos agudos, tais como explosões, incêndios e emissões, individualmente ou combinados, envolvendo uma ou mais substâncias perigosas com potencial de causar simultaneamente múltiplos danos ao meio ambiente e à saúde dos seres humanos expostos, com potencial da gravidade e extensão dos seus efeitos ultrapassarem os seus limites espaciais (bairros, cidades

e países) e temporais (teratogênese, carcinogênese, mutagênese e danos a órgãos alvos específicos).

O sistema capitalista consolidado com as mudanças nos padrões de consumo da sociedade impulsionou o crescimento da indústria e o uso de substâncias químicas perigosas (Pereira e Quelhas, 2010). Segundo Freitas *et al.* (1995), as emissões líquidas e, principalmente, gasosas dessas substâncias podem atingir grandes extensões e um número cada vez maior de pessoas.

Freitas *et al.* (1995), Bonatti e Carmo (2017) e Ardito (2020) destacam o acidente ocorrido em 1984 em Bophal na Índia como o maior desastre tecnológico com produto químico da história. Uma explosão nos tanques armazenando toneladas de isocianato de metila (C_2H_3NO) provocou um vazamento de gás culminando na morte milhares de pessoas. Freitas (2021) descreve a ocorrência em 2010 com a plataforma Deepwater Horizon como o maior desastre ambiental da indústria do petróleo, quando após perder o controle de um poço durante atividade de perfuração, explosões e incêndios causaram mortes e uma grande quantidade de petróleo foi liberada no mar.

A ocorrência de acidentes associados às atividades de petróleo e gás começou a se intensificar com o crescimento desse ramo. De acordo com Pereira e Quelhas (2010), estatísticas internacionais apontam que esses acidentes têm sua maior severidade (maior número de mortos) em países em desenvolvimento e de economia semiperiférica, como Índia, México e Brasil. Isso devido em partes a precarização das condições de trabalho, além da ausência de legislação específica, ou mesmo normas específicas, o que acarretava no aumento da severidade dos acidentes. Segundo Mariano (2001), existem alguns eventos característicos que podem potencialmente se transformar em emergências maiores e estes constituem a base da tipologia de acidentes para essa indústria. Dentre estes, citam-se:

- Liberação de gases inflamáveis e/ou explosivos para a atmosfera, em consequência de furos ou rupturas em tubulações, rompimento de juntas de flanges, perda de selagens de compressores, perda de chama nos flares e/ou do rompimento de selos de bombas;
- Liberação de gases tóxicos para a atmosfera;
- Vazamentos de líquidos com formação de poça ou jato de fogo;
- Explosões de equipamentos devido à entrada de ar nos sistemas que contenham hidrocarbonetos aquecidos;
- Incêndios em materiais de revestimento ou canaletas de drenagem com resíduos de produtos inflamáveis;
- Explosões de vasos e esferas de estocagem devido a uma sobrepressão;
- Derramamentos de óleo com contaminação do corpo hídrico receptor.

Os acidentes passíveis de ocorrer na indústria de petróleo e gás podem trazer inúmeros danos para o meio ambiente comprometendo a qualidade do solo, do ar e das águas, além de degradação de ecossistemas, com prejuízos à fauna e à flora (Mariano, 2001; Martins *et al.*, 2015). Estes acontecimentos vão desde um pequeno vazamento até explosões em magnitudes elevadas conhecidas como BLEVE podendo atingir vidas humanas drasticamente (Alves *et al.*, 2018).

De acordo Neto (2015), uma explosão se caracteriza pela liberação de energia em um volume reduzido no espaço curto de tempo, ocasionando um aumento de pressão na região da ocorrência, por conseguinte a geração de uma onda de choque. Segundo Alves *et al.* (2018), o fenômeno BLEVE corresponde a um surto catastrófico de um vaso de pressão em que ocorre uma fuga súbita para a atmosfera de uma grande massa de líquido superaquecido ou gás pressurizado liquefeito. O BLEVE geralmente possui uma grande área de abrangência, com tendência a trazer consequências imensuráveis às pessoas e patrimônios e representa um dos riscos relacionados ao condensado de gás natural.

Um dos principais efeitos do BLEVE é o nível alto de exposição à radiação térmica. Quites e Lia (2005) definem radiação como o processo pelo qual o calor é transferido de uma superfície em alta temperatura para uma superfície em temperatura mais baixa quando estas superfícies estão separadas no espaço, ainda que exista vácuo entre elas. A energia assim transferida é chamada radiação térmica e é feita sob a forma de ondas eletromagnéticas.

De um modo geral, um BLEVE ocorre quando as seguintes condições estão presentes:

- O produto envolvido é um líquido ou um gás liquefeito (inflamável ou não);
- O recipiente utilizado para armazenamento é confinado (tambor, tanque, esfera, cilindro);
- A temperatura do líquido é maior que a sua temperatura de ebulição à pressão atmosférica normal e, portanto, a pressão no recipiente é muito maior que a pressão atmosférica ambiente;
- Ocorre a falha do recipiente que pode ser ocasionada pela presença de fogo nas imediações, fraqueza estrutural, falha da válvula de segurança, impacto, etc.

O fator principal que antecede esse fenômeno é a elevação da temperatura do líquido e o consequente aumento da pressão interna no vaso de pressão até ao momento em que ele não suporta a diferença de pressão e ocorre seu rompimento brusco sucedido do BLEVE (RSE, 2022) (fig. 2).

De forma geral, a ocorrência dos acidentes está relacionada à sucessão de eventos que envolvem falhas na operação, falta de manutenção preventiva e decisões

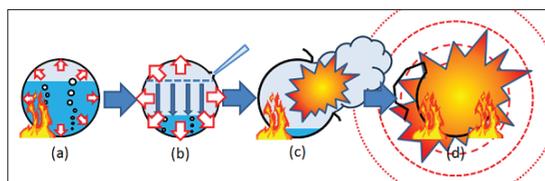


Fig. 2 - Fenômeno BLEVE: a) Fragilização do metal do vaso e aumento da pressão interna; b) Falha do vaso, com depressurização e mudança brusca de fase; c) Explosão do vaso e lançamento de fragmentos; d) Propagação das ondas de pressão e formação de bola de fogo (Fonte: RSE, 2022).

Fig. 2 - BLEVE Phenomenon: (a) Weakening of the vessel metal and increase in internal pressure; (b) Vessel failure, with depressurization and abrupt phase change; (c) Vessel explosion and projection of fragments; (d) Propagation of pressure waves and fireball formation (Source: RSE, 2022).

em desacordo com a segurança operacional, resultando na efetivação do dano. Moreira (2017) menciona alguns destes acidentes na indústria de óleo e gás (QUADRO II).

Assim percebe-se os efeitos de uma explosão sobre pessoas, equipamentos e edificações, os efeitos primários, de uma BLAVE para os seres humanos, são devidos ao aumento repentino na pressão, quando a onda de choque os atinge, podendo causar, danos ao órgão humanos sensíveis à pressão, como o aparelho auditivo e respiratório (Schmitt, 2009). Os efeitos indiretos podemos destacar: fragmentos metálicos decorrentes da explosão, que funcionam como um míssil, classificados como framentos primários, além telhas tijolos areias, entre outros, classificados como fragmentos secundários, que embora não atinga a mesma velocidade dos fragmentos primários atingem altas velocidades (Schmitt, 2009). O deslocamento de ar em uma explosão em alguns casos arremessa pessoas a grandes distâncias, podendo gerar diversos ferimentos devido a queda e colisões, a este efeito é classificado como terciário (Schmitt, 2009).

Portanto, os desastres tecnológicos associados à indústria de petróleo e gás podem causar mortes e diversos danos ambientais. Castro (2007) descreve os modelos computacionais como uma tecnologia a ser utilizada nos estudos ambientais para avaliar uma situação e aplicar um diagnóstico antes mesmo de algum evento ocorrer. O uso destes modelos possibilita estimar as proporções de um acidente com substâncias químicas que podem alcançar vastas extensões e atingir os trabalhadores atuantes nos próprios sítios industriais, moradores, pessoas em trânsito ou em locais no raio do evento (Franco; Druck, 1998).

Software ALOHA

O ALOHA é um programa de modelagem de perigos, sendo amplamente utilizado para responder e responder a emergências químicas (US EPA, 2024). O *software* foi desenvolvido pela Divisão de Resposta a Emergências 1 (ERD), divisão esta dentro da Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA) em colaboração com o Escritório de Gerenciamento de Emergências da Agência de Proteção Ambiental (EPA) dos Estados Unidos EUA (US EPA, 2024). Seu principal objetivo é fornecer estimativas de resposta de emergência da extensão espacial de alguns perigos comuns associados a derramamentos de produtos químicos. Este também pode ser uma ferramenta apropriada para treinamento e planejamento de contingência (Jones *et al.*, 2013).

A partir da definição da substância de interesse para simulação, o software baseia-se no seu peso molecular, tamanho da fuga e temperatura da nuvem de gás para determinar de forma automática o modelo a ser empregado modelo gaussiano; de gases pesados DEGADIS - *Dense Gas Dispersion* ou de incêndio e explosão; (Alves *et al.*, 2018; Anjana *et al.*, 2018). A equação gaussiana descreve uma curva em formato de sino na qual há menos

QUADRO II - Acidentes na indústria de óleo e gás em diversas regiões do planeta.

TABLE II - Accidents in the oil and gas industry in various regions of the planet.

Acidente	Ano	Local	Causa	Volume (barris)	N.º de mortos	Tipo
Torrey Canyon	1967	Grã Bretanha	Encalhamento	900.000	-	Petroleiro
Atlantic Empress	1979	Tobago Caribe	Colisão de petroleiros	2.152.500	27	Petroleiro
Alexander Kielland	1980	Mar do Norte	Deterioração metálica	-	123	Plataforma
Castillo de Bellver	1983	África do Sul	Incêndio e explosão	1.890.000	3	Petroleiro
Enchova	1984	Bacia de Campos BR	Explosão	-	37	Plataforma
Vila de Socó	1984	São Paulo BR	Incêndio	4.500	93	Oleoduto
Piper Alpha	1988	Mar do Norte	Incêndio e explosão	-	167	Plataforma
Fergana Valley	1992	Uzbequistão	Explosão	2.137.500	-	Poço terrestre
Baía de Guanabara	2000	Brasil	Vazamento	8200	-	Oleoduto
P-36	2001	Bacia de Campos BR	Explosão	7600	11	Plataforma
Deepwater Horizon	2010	Golfo do México	Má cimentação do poço	4.900.000	11	Plataforma
Amuay	2012	Venezuela	Vazamento e explosão	-	42	Refinaria
Torre Pemex	2012	México	Vazamento e incêndio	-	37	Centro de gás
FPSO São Mateus	2015	Brasil	Vazamento e explosão	-	9	Plataforma

Fonte: Adaptado de Moreira, 2017 / Source: Adapted from Moreira, 2017.

observações nos extremos (caudas) e mais observação no domínio intermediário, À medida que o poluente se desloca mais na direção do vento, ele se espalha e o “formato de sino” torna-se continuamente mais largo e mais plano (Chakraborty e Armstrong, 2005) todavia nessa simulação ocorre a BLAVE, incendiando essa nuvem tóxica gerando as conseqüências descritas anteriormente. O ALOHA usa a velocidade do vento, cobertura de nuvens e data e hora informadas para selecionar automaticamente a classe de estabilidade atmosférica (EPA, 2016).

Melo e Kawano (2008) define estabilidade atmosférica como o conjunto de fatores meteorológicos que determinam o grau de dispersão dos poluentes no ar e pode variar desde muito instável que corresponde a um elevado nível de turbulência a muito estável com turbulência mínima. O esquema de classificação deste grau foi representado por Pasquill (1961) estabelecendo seis classes de estabilidade (QUADRO III):

QUADRO III - Classes de estabilidade atmosférica.

TABLE III - Classes of atmospheric stability.

A	Muito instável
B	Moderadamente instável
C	Levemente instável
D	Neutra
E	Levemente estável
F	Moderadamente estável

Fonte/Source: adaptado de/ adapted from Pasquill, 1961.

O algoritmo do software foi projetado para fornecer uma avaliação das zonas de ameaça usando informações que são comumente disponíveis para socorristas durante uma emergência. Estas zonas são representadas graficamente demonstrando a área onde existe a possibilidade de exposição a vapores tóxicos, uma atmosfera inflamável, sobrepessão da nuvem de vapor, explosão ou radiação térmica de incêndio. O usuário é obrigado a fornecer dados locais das condições atmosféricas, a identidade do produto químico e detalhes sobre o cenário do derramamento. Para minimizar os requisitos de elementos de entrada, um extenso banco de dados de propriedades químicas e geográficas estão incluídos no *software* (Jones *et al.*, 2013).

As zonas de ameaça estão na faixa de 10 quilômetros. O *software* limita a duração de qualquer fonte a uma hora e a menor duração permitida é um minuto, denominada liberação instantânea. A plataforma também inclui dados de latitudes, longitudes, altitudes e fusos horários para muitas cidades que são usados para calcular a radiação solar e a pressão ambiente local (Alves *et al.*, 2018).

Os arquivos de dados incluem produtos químicos que têm potencial para se envolver em liberações acidentais e gerar perigos atmosféricos tóxicos ou representar ameaça de incêndio ou explosão. A biblioteca química do *software* é um subconjunto dos produtos encontrados no

Computer Aided Management of Emergency Operations (CAMEO), um banco de dados de produtos perigosos compilado e mantido pela NOAA e EPA (NOAA, 2020).

O ALOHA emprega uma variedade de modelos para estimar a taxa na qual um produto químico é liberado do confinamento e entra na atmosfera. Estes são referidos como modelos força da fonte. Este programa pode prever a força da fonte para quatro classes gerais de liberações químicas: (Jones *et al.*, 2013):

- Liberação instantânea ou contínua de vapores químicos no ar a partir de único ponto;
- Poça de área constante contendo um líquido não fervente ou fervente;
- Tanque cilíndrico ou esférico ao nível do solo com um único orifício ou válvula com vazamento. O tanque pode conter um líquido, gás pressurizado ou gás liquefeito sob pressão. O conteúdo pode escapar diretamente para a atmosfera ou primeiro formar uma evaporação de espalhamento piscina;
- Tubo pressurizado contendo gás, seja conectado a um reservatório muito grande ou não conectado a qualquer recipiente de armazenamento.

O software ALOHA é capaz de estimar a quantidade de substância liberada no ar como resultado da ruptura de um tanque contendo gases pressurizados, líquidos à pressão ambiente, gases liquefeitos por refrigeração e gases liquefeitos sob pressão. Ele lida apenas com tanques que contenham um único produto químico, não estimando os efeitos de uma segunda substância, como o ar ou um gás inerte. Conforme o material é liberado, as condições dentro dos recipientes são automaticamente reavaliadas, e o cálculo da taxa de liberação é ajustado conforme necessário. Isso significa que o software é capaz de prever a dispersão dessas substâncias perigosas no ambiente, auxiliando na avaliação dos riscos à saúde humana e ao meio ambiente em caso de acidentes químicos (Jones *et al.*, 2013; EPA, 2016). Essa capacidade de modelagem torna o ALOHA uma ferramenta importante para agências governamentais, empresas e profissionais de segurança no planejamento de emergências e na resposta a incidentes químicos.

Resultados

Os dados de entrada necessário para gerar o modelo são descritos na TABELA I. Embora seja requisitos necessários para gerar o modelo, os dados de velocidade e direção de ventos, parecem não influenciar significativamente na formação das zonas de riscos. Os resultados obtidos através das simulações durante BLEVE do condensado de gás natural são apresentados graficamente pelo *software* ALOHA. As zonas de ameaça são referenciadas conforme o nível de exposição à radiação térmica. Na fig. 3A, verificam-se estas zonas para o primeiro cenário. Embora o software utilize as coordenadas métricas e a altitude, para

posicionar no espaço e topograficamente o modelo gerado, a geomorfologia local não é levada em consideração.

A representação gráfica do cenário 1 foi exportada para o *Google Earth*, permitindo a visualização das zonas de ameaça conforme a (fig. 3B).

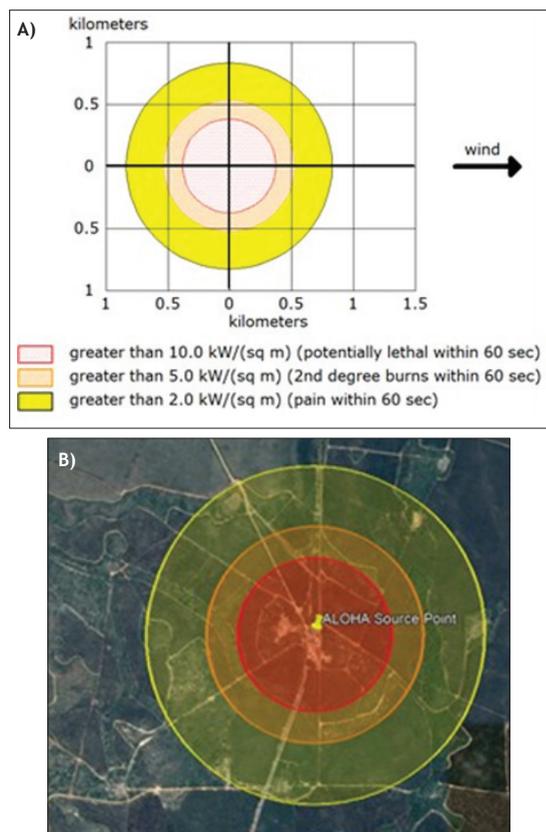


Fig. 3 - Apresenta o cenário 1 observando em quilômetros a área atingida pela bola de fogo (a), é possível observar a região afetada pela explosão através da imagem disponível no *Google Earth* (b).

Fig. 3 - Shows scenario 1, with the area affected by the fireball indicated in kilometres (a). The region affected by the explosion can be seen in the image available on *Google Earth* (b).

As zonas modeladas se dividem em:

- Vermelha: pode gerar uma radiação térmica maior que 10 kW/m², capaz de ser potencialmente letal com exposição de 60 segundos;
- Laranja: pode gerar uma radiação térmica maior que 5 kW/m² e menor que 10 kW/m², capaz de ocasionar queimaduras de segundo grau com exposição de 60 seg.;
- Amarela: pode gerar uma radiação térmica maior que 2 kW/m² e menor que 5 kW/m², capaz de ocasionar dores com exposição de 60 segundos;

Esta delimitação e possíveis consequências são atribuídas automaticamente pela plataforma através dos limites de preocupação recomendados pela *National Fire Protection Association* (NFPA) (Jones *et al.*, 2013). A abrangência

da explosão no cenário 1 é de aproximadamente 1,6 quilômetros (km), se distribuindo com a área vermelha com raio de 378 metros (m), a laranja com raio 534 m e a amarela com raio 832 m.

A interface gráfica e visualização do *Google Earth* do cenário 2 são demonstradas nas fig. 4A e 4B.

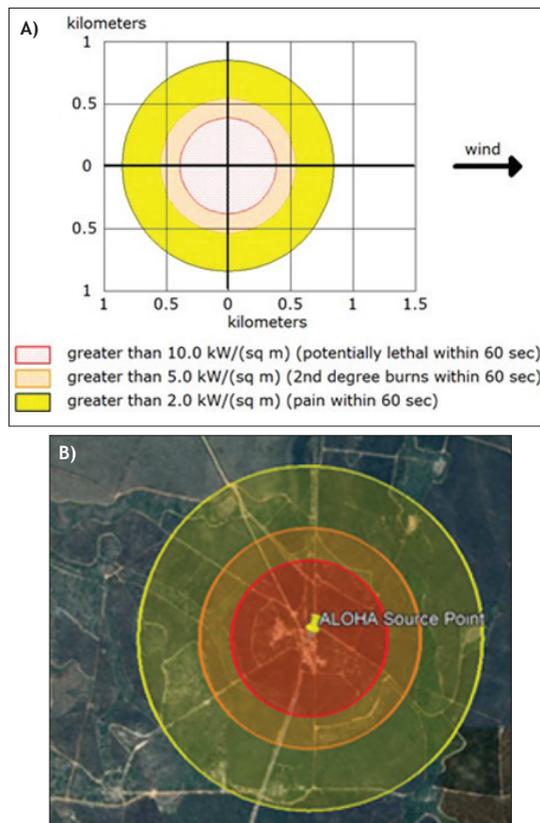


Fig. 4 - Apresenta a área atingida no segundo cenário(a), a região pode ser melhor identificada com a plotagem do cenário 2 no *Google Earth* (b).

Fig. 4 - Shows the area affected in the second scenario (a). The region can be better identified with the plotting of scenario 2 on *Google Earth* (b).

Apresentamos os dados do terceiro panorama nas fig.s 5A e 5B. Esses dados são cruciais para analisar os riscos associados à explosão de barris de petróleo.

O QUADRO IV apresenta um resumo dos resultados dos raios das explosões, conforme as zonas de ameaça dos cenários simulados:

QUADRO IV - Raios de explosão dos cenários 1, 2 e 3.

TABLE IV - Explosion radii of scenarios 1, 2, and 3.

	Cenário 1 (m)	Cenário 2 (m)	Cenário 3 (m)
Vermelha	378	384	414
Laranja	534	543	585
Amarela	832	847	914

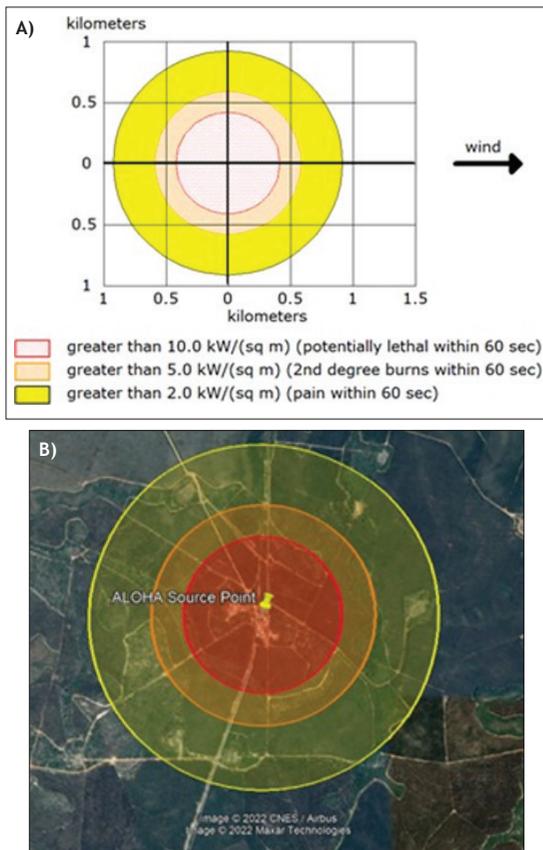


Fig. 5 - Mostra a materialização cartográfica do terceiro cenário da simulação (a), a área afetada pela explosão é evidenciada através da imagem do Google Earth (b).

Fig. 5 - Represent the cartographic representation of the third scenario of the simulation (a), with the area affected by the explosion highlighted through the Google Earth image (b).

Em todos os cenários, o diâmetro da “bola de fogo” foi de 174 m e o tempo de queima de 12 segundos, devido à massa de undecano no recipiente ser a mesma em ambos. Observa-se que nas simulações realizadas, a explosão alcança a abrangência máxima de 1,8 km no cenário 3 e a energia liberada poderia ser letal *in loco*. Percebe-se também nas visualizações do Google Earth que os entornos da EGNA são compostos majoritariamente por vegetação, destacamos que parte dessa vegetação é remanentes da mata atlântica, habitat natural de diversas espécies, outra vegetação comum na área são as savanas, que são áreas que estão no processo de recuperação devido as supreção vegetal do passado. A reigão também apresentar a silvicultura do eucalipto, ou seja podemos pensar no complexo uso do espaço, que seria afetado e caso de uma explosão, desde a morte de diversas espécies da fauna e da flora, além de prejuizos economicos pela perda de eucaliptos. Uma das limitações do software é que o mesmo gera apenas uma simulação por EGNA, sendo que uma das consequencias possíveis seria o espalhamento das chamas para outros vasos e dutos. Todavia, apesar da

distância de moradias e estabelecimentos comerciais, a ocorrência do evento modelado poderia atingir pessoas que estivessem em trânsito próximo ao local, como os trabalhadores do local. Além disso destacamos que a bacia hidrográfica a qual esta situada o EGNA é a mesma que abastece a capital baiano, ou seja, problemas de contaminação neste local poderia impactar uma população de aproximadamente 2,4 milhoes de pessoas.

Os senários analisados tiveram abrangência superior a 1 km. Todas as simulações, após as entradas dos dados climáticos, foram enquadradas na classe D de estabilidade atmosférica. De acordo (Anjana *et al.*, 2018), esta classe representa uma condição de estabilidade neutra, onde a turbulência gerada pelo vento pode fazer com que as nuvens se dispersem para uma distância maior da fonte de liberação. A escolha desse cenários se dá por ser a mais constante na atmofera local, pois os dados de entrada do modelo foram as normais climatolgica, com isso surgem novas questões de pesquisas, em condições adversas como se comportariam a BLEVE? Essa pergunta necessita de uma novas simulação testando as condições extrema, que poderão torna-se frequente com as mudanças climáticas.

Observou-se que ao especificar a modelagem BLEVE, o *software* estabelecia automaticamente a temperatura interna no vaso de pressão no momento da falha de 230°C. Esta temperatura é superior ao ponto de ebulição do undecano no banco de dados CAMEO, 194,7 °C. Conforme Alves *et al.* (2018), em uma possível seqüência de fatos para um acidente desta magnitude, a fase em que esta variável aumenta desencadeia a intensificação da pressão interna provocando a ruptura do tanque.

Nos cenários de estudo foi realizada a comparação das zonas amarelas laranjas e vermelhas com os resultados demonstrados na fig. 6. Na primeira coluna está o cenário 01, na segunda coluna o cenário 02 e por fim na terceira coluna, o cenário 03. Observa-se que a medida que variamos os cenários, ou seja, almentamos a temperatura do ar e a velocidade do vento, reduzimos a umidade relativa e a cobertura de nuvem constatamos o almento siginificativo de cada cenário. A variação da zona de ameaça em amarelo, para o primeiro cenário possui área de 2179861 m², no segundo cenário essa área varia para 2302539 m², no terceiro cenário esse valor atinge 26264887 m² acarretando em um incremento de 22,2 % entre o primeiro e o terceiro cenário. Na zona laranja o primeiro cenário obteve uma área de 881412 m², no segundo cenário essa área atinge 920680 m² e no terceiro cenário à área chega a 1061459 m² uma variação de positiva de 20,4 %. Na zona vermelha o primeiro cenário tem área de 448235 m², o segundo possui 465619m² e o terceiro cenário área de 539246 m², uma variação de 20,3 % entre o primeiro e o terceiro cenário.

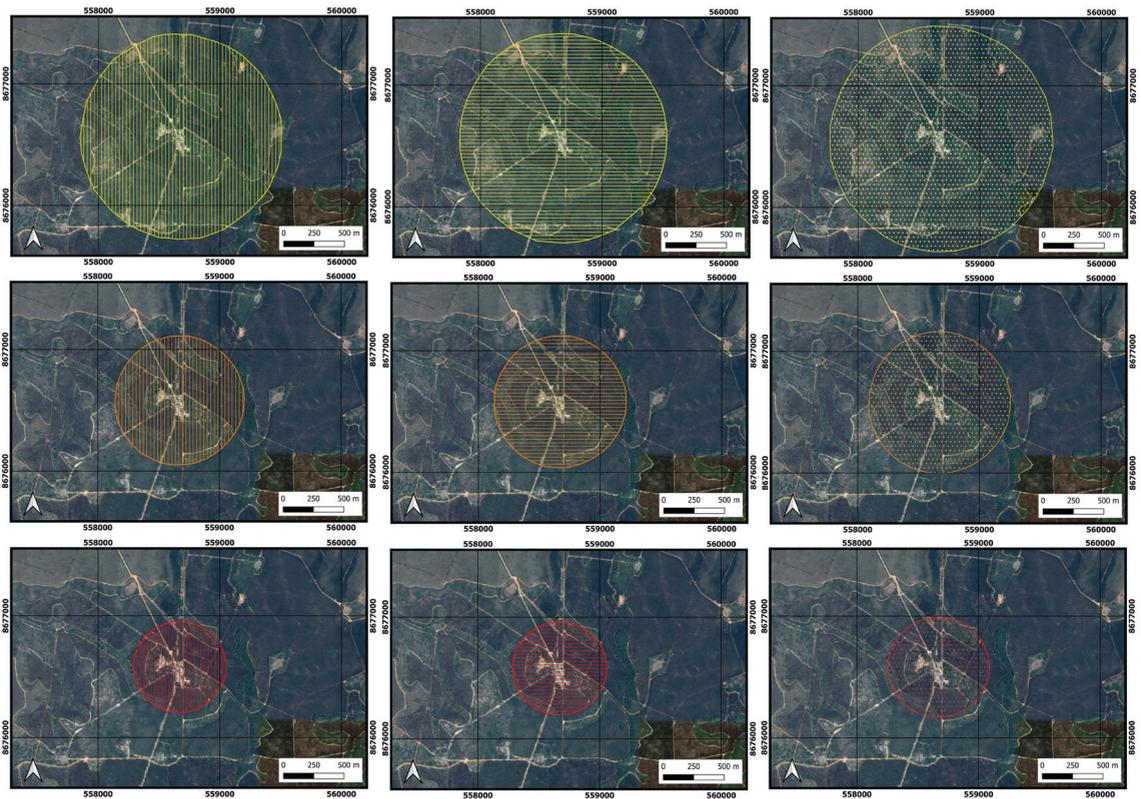


Fig. 6 - Comparação das zonas de ameaças: amarelo, laranja e vermelhos nos cenários 1, 2 e 3.

Fig. 6 - Comparison of threat zones, yellow, orange, and red, for scenarios 1, 2, and 3.

A fig. 6 demonstra a sensibilidade do modelo aos dados atmosféricos, onde variações na temperatura e umidade relativa resultaram em um aumento positivo de aproximadamente 20,9 % nas áreas de perigo 1 e 3. Esses dados são essenciais para simulações em tanques de pressão. É importante ressaltar que, embora a quantidade de fluido no tanque seja a mesma nos três cenários, 60 % da sua capacidade, houve diferenças nos raios de explosão em cada zona de perigo. Isso ocorreu devido às modificações nas variáveis climatológicas conforme foi apresentado no QUADRO I. Por exemplo, os cenários 1 e 2 apresentam maior umidade do ar, a qual está diretamente relacionada à transmissividade atmosférica e aos processos de atenuação da radiação térmica, conforme descrito nas Equações 5 e 6. Essas considerações são fundamentais para a compreensão dos resultados das simulações e para a avaliação dos riscos associados.

Além disso, a variação na temperatura e umidade relativa também pode afetar a estabilidade do ambiente ao redor do tanque, influenciando a propagação das ondas de choque em caso de explosão. Esses fatores são essenciais para a definição de medidas preventivas e de segurança em instalações industriais que lidam com substâncias perigosas. Portanto, a análise detalhada das condições atmosféricas e sua influência nas simulações são de extrema importância para garantir a segurança e minimizar os riscos em ambientes industriais.

Conclusão

Com base nas simulações realizadas, foi possível identificar e quantificar as exposições radiantes da explosão em um vaso de pressão contendo o condensado de gás natural. Constatou-se que o fenômeno conhecido como *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (BLEVE) representa um desastre tecnológico que pode ocorrer em atividades industriais, gerando efeitos catastróficos. Portanto, é essencial conhecer em profundidade os fatores que podem levar à sua ocorrência.

Os resultados das simulações indicaram que, apesar de existir uma pequena diferença nos raios de explosão entre os cenários estudados, o terceiro cenário demonstrou o maior risco e alcance da radiação térmica. É relevante destacar, no entanto, que o software utilizado apresenta limitações na avaliação das reações em cadeia, pois os fragmentos lançados do vaso acumulador e a energia liberada poderiam ocasionar vazamentos, incêndios e explosões em outros reservatórios ou tubulações.

Os dados obtidos revelaram a importância crucial da modelagem de cenários de explosão e da dispersão atmosférica para determinar com precisão as áreas de impacto, especialmente quando se trata de substâncias químicas tóxicas e inflamáveis, que podem causar danos devastadores tanto ao patrimônio da indústria quanto ao

meio ambiente circunvizinho. Além disso, a partir das zonas de ameaça identificadas e das visualizações no *Google Earth* e/ou Sistemas de Informações Geográficas, é possível estimar a presença de populações expostas que poderiam ser afetadas em caso de um acidente dessa natureza.

Destaca-se também o papel essencial de ferramentas como o ALOHA, que podem auxiliar no treinamento de emergências e na tomada de decisões estratégicas para melhorar a segurança do processo industrial e reduzir os tempos de resposta em situações de desastre tecnológico.

Em síntese, a pesquisa permitiu avançar significativamente no entendimento dos riscos relacionados à explosão de barris de petróleo e seus impactos potenciais. Os resultados destacam a importância da prevenção, da capacitação de equipes de emergência e do aprimoramento dos protocolos de segurança para minimizar os efeitos devastadores de desastres tecnológicos desse tipo. Com base nas lições aprendidas, espera-se que medidas proativas sejam adotadas para proteger tanto a indústria quanto o meio ambiente circundante, garantindo um futuro mais seguro e sustentável para todos.

Referências bibliográficas

- Alcantara, V. (2012). Inserção curricular na educação ambiental (1º ed, Vol. 1). IESDE. URL: https://arquivostp.s3.amazonaws.com/qcursos/livro/LIVRO_insercao_curricular_da_educacao_ambiental.pdf
- Alves, C. N., Lameira, J., Silva, J. R. de A., Brasil, D. do S., Siqueira, G. W., Meneses, C. C., Silva, E. L. de A., & Costa, C. H. S. da. (2018). *Educação ambiental e sustentabilidade na Amazônia—V 2* (Vol. 2). Universidade Federal do Pará. URL: <https://livroaberto.ufpa.br/jspui/handle/prefix/330>
- Anjana, N. S., Amarnath, A., & Harindranathan Nair, M. V. (2018). Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 210, 201-209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.021>
- ANP. (2020). Processamento de Gás Natural. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. URL: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-de-derivados-de-petroleo-e-processamento-de-gas-natural/processamento-de-gas-natural/apresentacao>
- Ardito, D. (2020). *Governança e gestão de riscos de desastres tecnológicos*. 2(3). URL: <https://periodicos.ufms.br/index.php/REP/article/view/12546>
- Belloví, M. B., & Sierra, E. T. (2018). NTP 293: Explosiones BLEVE (I): Evaluación de la radiación térmica. *NTP 293: Explosiones BLEVE (I): evaluación de la radiación térmica*, 1(1), 10.
- Bonatti, T. F., & Carmo, R. L. do. (2017). Desastres tecnológicos: Revisitando a discussão sobre a questão dos eventos de contaminação a partir da relação entre população, espaço e ambiente. *Anais*, 0, Artigo 0.
- Braga, B., Hespanho, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L. de, Spencer, M., Porto, M., Nucci, N., Juliano, N., & Eiger, S. (2005). Introdução à engenharia ambiental: Vol. Unico (2º ed). Pearson Education do Brasil. URL: <http://pergamum.ifsp.edu.br/pergamumweb/vinculos/000067/00006705.pdf>
- Cameron, I. T. & Raman, R., (2005). Process Systems Risk Management. *Elsevier*. [Online] Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/bookseries/18745970/6>
- Chakraborty, J., Armstrong, M.P., (1996). Using Geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents, *Environment and Urban Systems*. [Online] 19, 341-356. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0198971595000186>
- Castr, A. F. de. (2007). Sistemas computacionais espaço-temporais para tomada de decisão em questões ambientais relacionadas à indústria de petróleo e gás [Universidade Federal do Rio Grande do Norte UFRN]. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18342>
- CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (1994). Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs: CCPS/ Guidelines. John Wiley & Sons, Inc. DOI: <https://doi.org/10.1002/9780470938157>
- Chakraborty, J., & Armstrong, M. P. (1995). Using Geographic Plume Analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents. *Computers, Environment and Urban Systems*, 19(5-6), 341-356. DOI: [https://doi.org/10.1016/0198-9715\(95\)00018-6](https://doi.org/10.1016/0198-9715(95)00018-6)
- Cook, J., Bahrami, Z., & Whitehouse, R. J. (1990). A comprehensive program for calculation of flame radiation levels. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 3(1), 150-155. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-4230\(90\)85039-C](https://doi.org/10.1016/0950-4230(90)85039-C)
- Cordeiro, M. G. S. (2017). Gás e energia: Utilização do gás natural diante à demanda energética e manutenção do meio ambiente. *Diversitas Journal*, 2(1), 39. DOI: <https://doi.org/10.17648/diversitas-journal-v2i4.340>
- Costa Neto, M. L. D. (2015). Um estudo do fenômeno explosão e das ondas de choque utilizando a

- fluidodinâmica computacional [Master, Universidade de Brasília].
DOI: <https://doi.org/10.26512/2015.03.D.18449>
- Ferreira, A. G., & Mello, N. G. D. S. (2005). Principais sistemas atmosféricos atuantes sobre a região nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. *Revista Brasileira de Climatologia*, 1(1).
DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- Fioreze, M., Hedlund, K. F. S., Graepin, C., Silva, T. C. N., Azevedo, F. C. G. de, & Kemerich, P. D. da C. (2013). Gás natural: potencialidades de utilização no Brasil. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, 2251-2265.
DOI: <https://doi.org/10.5902/223611707896>
- Franco, T., & Druck, G. (1998). Padrões de industrialização, riscos e meio ambiente. *Ciência & Saúde Coletiva*, 3, 61-72.
DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-81231998000200006>
- Freitas, C. M. de, Porte, M. F. de S., & Gomez, C. M. (1995). Acidentes químicos ampliados: Um desafio para a saúde pública. *Revista de Saúde Pública*, 29, 503-514.
DOI: <https://doi.org/10.1590/S0034-89101995000600012>
- Freitas, K. P. de M. (2021). Gerenciamento de riscos ambientais na indústria do petróleo. *Revista Valore*, 6(0), Artigo 0.
DOI: <https://doi.org/10.22408/rev602021429e-6013>
- Gerhardt, T. E., & SILVEIRA, D. T. (2009). Métodos de pesquisa: Vol. Unico (1º ed). UFRGS. URL: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>
- Gil, A. C. (2008). Métodos e técnicas de pesquisa social: Vol. Unico (6º ed). Atlas. URL: <https://ayanrafael.files.wordpress.com/2011/08/gil-a-c-mc3a9todos-e-tc3a9cnicas-de-pesquisa-social.pdf>
- Gonçalves, A. O., Ferraz, R. P. D., Caldeira, N., & Gachet, G. F. (2005). Caracterização Climática da Área Petrolífera de Buracica, Município de Alagoinhas, Estado da Bahia, como Subsídio para Ações de Recuperação de Áreas Degradadas.
- INMET ([s.d.]). Normais climatológicas do Brasil. Recuperado 27/0/2023, de <https://portal.inmet.gov.br/normais>
- Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D., & Reynolds, R. M. (1986). Department of Commerce/National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). *The Bulletin of the Ecological Society of America*, 67(1), 16-19. DOI: <https://doi.org/10.2307/20166482>
- Júnior, A. H. da S., Santos, N. L. dos, Silva, A. da, & Lopes, T. J. (2015). Análise das consequências em possíveis cenários de vazamento envolvendo o sulfeto de hidrogênio em refinarias de petróleo. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, 1(3), 562-567. URL: <https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/anlise-das-consequencias-em-possiveis-cenrios-de-vazamento-envolvendo-o-sulfeto-de-hidrognio-em-refinarias-de-petrleo-19693>
- Leal, G. C. S. de G., Farias, M. S. S. de, & Araujo, A. de F. (2008). O processo de industrialização e seus impactos no meio ambiente urbano. *O processo de industrialização e seus impactos no meio ambiente urbano*, 7(1), 1-11.
- Lisboa, H. de M., & Kawano, M. (2008). Controle da poluição atmosférica: Vol. Unico (1º ed).
- Lopes, I. T. de P. (2017). Gestão de riscos de desastres: integrando os riscos de acidentes industriais à gestão territorial [UFRJ]. URL: http://www.ppe.ufrj.br/images/Isadora_Timb%C3%B3_de_Paula_Lopes.pdf
- Lopes, T. J., Santos, N. L. dos, Jr, A. H. da S., & Correio, A. da S. (2016). Análise Estatística da consequência de cenários hipotéticos de acidentes com vazamento do gás cloro obtidos por simulação utilizando o software Aloha. RECEN - *Revista Ciências Exatas e Naturais*, 18(2), Artigo 2.
- Mariano, J. B. (2001). Impactos ambientais do refino de petróleo [COPPE/UFRJ]. URL: <http://antigo.ppe.ufrj.br/ppes/production/tesis/jbmariano.pdf>
- Martins, S. S. da S., Azevedo, M. O. de, Silva, M. P. da, & Silva, V. P. da. (2015). Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações. *HOLOS*, 6, 54-76.
DOI: <https://doi.org/10.15628/holos.2015.2201>
- Mendonça, S. (2009). Desastres, colapsos e catástrofes. Universidade Autónoma de Lisboa. Disponível em: <https://repositorio.ual.pt/handle/11144/1094>
- Montenegro, R. S. P., & Pan, S. S. K. (2000). Gás natural com o matéria-prima para a produção de eteno no Estado do Rio de Janeiro. 1(12), 26.
- Moreira, J. F. M. (2017). *Acidentes na indústria de petróleo e seus impactos na segurança operacional e preservação ambiental [Universidade Federal Fluminense]*. URL: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/4134>
- Moreira, J. F. M. (2020). Acidentes relevantes. Anais III CONEPETRO. URL: https://www.editorarealize.com.br/editora/anais/conepetro/2018/TRABALHO_EV104_MD4_SA110_ID1053_10072018184423.pdf
- Operadora B. (2021a). Operações de poços e instalações Processo produtivo de gás natural da Operadora B. Operadora B; Interno.
- Operadora B. (2021b). Relatório operacional mensal—Outubro, novembro e dezembro de 2021 [Operações de derivados de petróleo].

- Operadora B. (2022a). Relatório de inspeção de equipamentos (Relatório de inspeção de equipamentos 1). Operadora B.
- Operadora B. (2022b). Relatório operacional mensal -Janeiro, fevereiro e março de 2022 (1; Relatório operacional mensal -Janeiro, fevereiro e março de 2022). Operadora B.
- Pasquill, F. (1961). The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Meteorology Magazine*.
- Pereira, A. F. de A. N., & Quelhas, O. L. G. (2010). Os acidentes industriais e suas conseqüências. *4 th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XIV Congreso de Ingeniería de Organización*, 14. URL: http://adigor.es/congresos/web/uploads/cio/cio2010/HEALTH_AND_OCCUPATIONAL_SECURITY_MANAGEMENT_AND_ERGONOMICS/652-661.pdf
- Roberts, A. F. (1981). Thermal radiation hazards from releases of LPG from pressurised storage. *Fire Safety Journal*, 4(3), 197-212.
DOI: [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(81\)90018-7](https://doi.org/10.1016/0379-7112(81)90018-7)
- RSE. (2022). Fenômeno BLEVE - Gerenciamento de risco e sustentabilidade empresarial. RSE Global. URL: <https://www.rsem.com.br/artigo-fenomeno-bleve/>
- Santos, P. V. dos. (2012). Impactos ambientais causados pela perfuração em busca do petróleo. *Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - SERGIPE*, 1(1), Artigo 1.
- Schmitt, E. de M. (2009). *Análise de conseqüências de uma explosão tipo BLEVE de um caminhão autotanque de GLP tipo "bobtail"*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Souza, M. M. D. de. (2017). Análise da viabilidade técnica e econômica de processar o gás natural para venda em plataformas de campos de gás retrógrado offshore [Universidade Federal de Minas Gerais]. <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-AVBNFE>
- Talavera, R., Martín, R. (2002). *Caracterização de sistemas simulação e otimização de etapas da planta de processamento de gás natural (tese de doutorado)*. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
- Thibodeaux, L. J. (1996). Environmental Chemodynamics Movement of Chemicals in Air, Water, and Soil (2° ed). John Wiley & Sons.
- US EPA, O. (2013, março 14). ALOHA Software [Data and Tools]. URL: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>
- US EPA, O. (2017, outubro 3). CAMEO Chemicals Software [Data and Tools]. URL: <https://www.epa.gov/cameo/cameo-chemicals-software>
- Zhou, K., & Wang, X. (2019). Thermal radiation modelling of pool fire with consideration on the nonuniform temperature in flame volume. *International Journal of Thermal Sciences*, 138, 12-23.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.12.033>