

Pós-Graduação

Segurança de Processos



ESTUDO DE VIABILIDADE DO EMPREGO DO SOFTWARE ALOHA PARA ESTIMATIVA DO ALCANCE DOS EFEITOS FÍSICOS DE UM JETFIRE EM UM FPSO

Alexandre H. C. C. de Aguiar, Gustavo de M. Vieira, Lucas S. M. Oliveira, Renan C. de Carvalho, Vitor L. Costa

RESUMO

O presente trabalho consiste em um estudo de viabilidade do emprego do software ALOHA para avaliação semiquantitativa dos riscos envolvidos em cenários acidentais de jet fire a partir de vazamentos de gás em diferentes pontos da unidade de separação trifásica no topside de uma planta de processo alocada no FPSO XPTO. Para essa análise foram utilizados os recursos do software gratuito ALOHA na avaliação dos níveis de efeito físico e seu respectivo alcance, além dos cálculos de frequência do cenário acidental, tendo como base os parâmetros de LSIR, IRPA e PLL. Os resultados calculados foram utilizados como base comparativa com o estudo real desta planta de processo desenvolvido por uma empresa com expertise no ramo de avaliação de risco usando as ferramentas LEAK / EXPRESS / ExploRAM / KFX. Foram observadas limitações importantes no ALOHA que restringiram seu uso em diferentes cenários de vazamento. Além disso, o software livre não demonstrou ter precisão suficiente para fornecer, de modo seguro e assertivo, a quantidade de fluxo de calor dentro das zonas perigosas fornecidas pela simulação. Já os valores calculados de LSIR, IRPA e PLL, apesar de terem sido considerados aceitáveis, continua sendo necessária, para uma correta e rigorosa avaliação do PLL, a integração dos resultados de cenários adicionais à análise de riscos total da unidade.

Palavras-chave: ALOHA, Análise Quantitativa, Risco Offshore, FPSO, Jet Fire.

ABSTRACT

The present work consists of a viability study for the use of ALOHA software to perform a semiquantitative assessment of risks involved of risks involved in accidental jet fire scenarios from different points in the three-phase separation unit on the topside of a process plant located at the XPTO FPSO. For this analysis, the free Software ALOHA was used to evaluate the physical effect levels and their respective extent, in addition to the frequency calculations of the accidental scenario, based on the parameters of LSIR, IRPA and PLL. The results acquired were used as a comparative basis with the actual study of this process plant developed by a company with expertise in the field of risk assessment using commercial tools such as LEAK / EXPRESS / ExploRAM / KFX. There were observed important limitations on software ALOHA which restricted its use in different leakage scenarios. Furthermore, the free software did not demonstrate enough precision to provide, in a safe and assertive manner, the heat flow amount into each one the danger zones provided by the simulation. Even though LSIR, IRPA and PLL values calculated were considered acceptable for workers to be exposed in daily work according to acceptance criteria, it is still required for a correct and stringent PLL evaluation the integration of calculated results with all remaining scenarios for the unit total risk analysis.

Keywords: ALOHA, Quantitative Analysis, Offshore Risk, FPSO, Jet Fire.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das atividades de exploração de petróleo em águas cada vez mais profundas, produziu a demanda por novos equipamentos e tecnologias de transporte do petróleo da unidade de produção até os locais de distribuição. A partir disso unidades com esses fins começaram a ser desenvolvidas e construídas com características convenientes de acordo com os parâmetros de cada local.

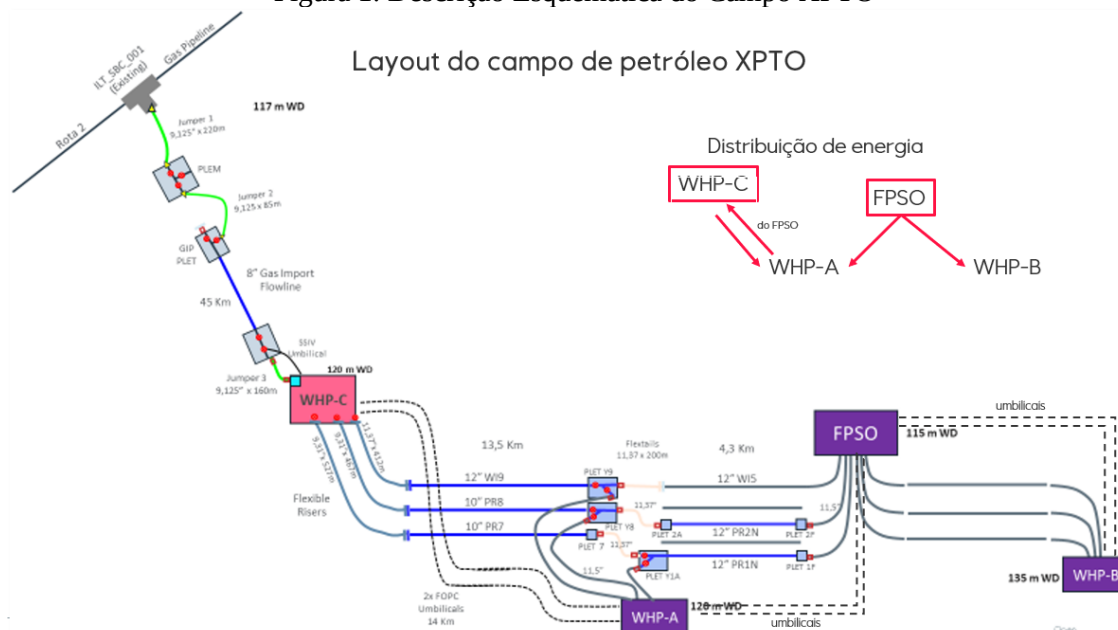
O FPSO (*Floating Production Storage and Offloading*), por exemplo, é uma das soluções encontradas para este fim, tratando-se de um sistema flutuante de exploração de petróleo que reúne numa única unidade as funções de produção, armazenamento e descarregamento para outros navios. Este sistema de produção flutuante recebe petróleo e gás de poços submarinos por meio de dutos condutores conhecidos como *risers*. Antes de entrar nos tanques de carga, o óleo proveniente dos poços produtores passa por um processo de separação da mistura petróleo, gás e água produzida, sendo, na sequência, estocado e de tempos em tempos, transferido para um navio aliviador amarrado à sua proa ou popa.

O navio XPTO de destaque neste estudo trata-se de uma plataforma do tipo FPSO e está localizado na Bacia de Campos, a 85km da costa do estado do Rio de Janeiro. A lâmina d'água varia de 95m a 135m.

O desenvolvimento do campo inclui duas plataformas do tipo cabeça de poço (*well head platform*, ou WHP). Cada plataforma do tipo cabeça de poço é conectada ao FPSO através de duas linhas de produção de óleo, uma linha de injeção de água produzida, e dois umbilicais para transmissão de energia. Água produzida é reinjetada nos poços das plataformas do tipo cabeça de poço. O desenho esquemático do campo XPTO está detalhado na Figura 1.

A segunda fase de produção do campo inclui uma terceira plataforma do tipo cabeça de poço, WHP-C, a qual é esperado adicionar em mais de 50% a produção de petróleo no Campo XPTO e aumentar em mais de 3 vezes a produção de gás, devido a essa plataforma ser conectada a um gasoduto conforme detalhado na tabela 1.

Figura 1: Descrição Esquemática do Campo XPTO



Fonte: FPSO XPTO *Quantitative Risk Analysis*, 2021.

Tabela 1: Características de produção do campo XPTO

	Atualmente sem a WHP-C	Com a WHP-C, previsto para 2022
Unidades marítimas	2 WHPs e 1 FPSO	3 WHPs e 1 FPSO
Grau API do petróleo	13 a 16° API	13 a 16° API
Viscosidade do petróleo	102.8 to 142.2cP @ P_{sat}	102.8 to 142.2cP @ P_{sat}
Capacidade de produção de gás	106k m ³ /d	351.1k m ³ /d
Capacidade de produção de petróleo	72k bbl/d	110 kbbbl/d
Número de poços de produção	45 (WHP-A: 22 e WHP-B: 23)	62 (WHP-A: 22, WHP-B: 23 e WHP-C: 17)
Número de poços de injeção de água	7 (WHP-A: 4 e WHP-B: 3)	12 (WHP-A: 4, WHP-B: 3 e WHP-C: 5)
Reinjeção de água produzida	94.4%	90%-100%

O FPSO XPTO é permanentemente ancorado através de um sistema de produção com turret submerso, que permite a embarcação de rotacionar 360 graus de acordo com condições metoceanográficas externas. As principais funções da embarcação são receber fluidos das plataformas do tipo cabeça de poço, realizar a separação entre óleo cru, gás natural e água produzida através de processos físicos, tratar a água produzida, injeção de produtos químicos, medição fiscal, geração e distribuição de energia, controle do processo de produção e acomodação.

Os sistemas de produção e utilidades são localizados em módulos. Eles são enfileirados

a bombordo e a boreste conforme a figura 2 e a tabela 2.

A capacidade de produção é de 15900m³/d de óleo cru, 37043m³/d de água produzida, e 55600m³/d de gás (documento interno, 2015).

Tabela 2: Descrição dos módulos do FPSO XPTO

Código do módulo	Descrição do modulo
M10A/B	Separação trifásica A e B
M11A/B	Coalescedor eletrostático
M20	Queimador
M30	Drenagem fechada e vent
M40	Medição fiscal
M50	tratamento de água produzida
M70	Utilidades
M80	geração de energia
M81	Caldeira
M82	sala de equipamentos locais
M90	Tubulações de processo



Fonte: FPSO XPTO *Quantitative Risk Analysis*, 2021.

Por se tratar de uma planta industrial flutuante, diversos perigos intrínsecos ao processo se fazem presentes durante a operação, e a ausência de controle dos riscos associados a estes perigos aumenta a possibilidade de promover cenários acidentais com consequências catastróficas como explosões e incêndios industriais. Por essa razão, é mandatório a execução de uma análise de risco de modo a reduzir os riscos a níveis aceitáveis ou, se justificável, ao nível ALARP (*As Low As Reasonably Practicable*).

Quando tratamos de análise de risco é importante ressaltar o conceito de que o risco é o produto entre a probabilidade de uma liberação, a probabilidade de exposição e das consequências da mesma. E para determinar o risco de uma instalação ou processo, podem ser utilizados tanto métodos qualitativos quanto quantitativos de análise, entretanto, quando se é necessário calcular o risco global do processo ou instalação, os métodos quantitativos ou semiquantitativos de risco são os mais indicados (CROWL; LOUVAR, 2015).

Apesar de se tratar de um método de análise mais complexo, a Análise Quantitativa de Risco (AQR) traz a grande vantagem de auxiliar na avaliação mais assertiva dos riscos de um possível cenário accidental, quando estes não podem ser devidamente compreendidos apenas com as análises qualitativas, principalmente em processos industriais mais complexos, com variáveis de processo como pressão e temperatura atingindo níveis elevados de operação (CCPS, 2000).

Tendo em vista o aumento do inventário de gás nas dependências do FPSO e partindo da premissa de que cenários de *jet fire* são os eventos preponderantes segundo a análise de risco original, tal cenário foi o foco deste trabalho sua análise.

O objetivo principal deste trabalho é comparar os resultados do alcance de efeito físico de *jet fire* obtidos através do *software* gratuito ALOHA, com os resultados de *softwares* comerciais como o LEAK / EXPRESS / ExploRAM / KFX, a fim de analisar a viabilidade de se utilizar o *software* ALOHA.

Os resultados obtidos são utilizados de subsídio para cálculo do Risco Individual por Local Específico (LSIR-*Location Specific Individual Risk*), Risco Individual por Ano (IRPA-*Individual Risk per Annum*) e Perda Potencial de Vida (PLL-*Potencial Loss of Life*) a fim de avaliar a frequência de danos às pessoas contidas em um raio de ação dos níveis de efeito físicos de interesse neste trabalho e os resultados finais são comparados com a avaliação de risco da unidade.

2. DESENVOLVIMENTO

As seguintes etapas foram aplicadas nesse estudo quantitativo de riscos:

2.1 Identificação dos Perigos

Uma análise preliminar dos perigos existentes na planta de processamento primária, HAZID (*Hazard Identification*), foi utilizada como base para identificar os perigos, causas e consequências na ocorrência de vazamento de gás proveniente do processo da separação trifásica durante a extração de hidrocarbonetos do poço e alimentação de equipamentos com o gás proveniente do processamento.

2.2 Identificação dos Cenários Acidentais

A escolha por cenários de *jet fire* foi efetuada devido ao aumento do inventário de gás chegando no FPSO após a inclusão da plataforma WHP-C e a importação de gás. Os locais escolhidos para modelar os vazamentos estão localizadas na área do separador

trifásico, módulo M10A/B, e em uma tubulação que transporta gás do separador trifásico para as caldeiras, conforme tabela 3.

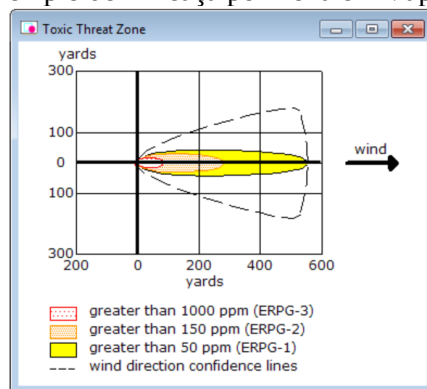
Tabela 3: Cenários de *jet fire* oriundos do estudo de risco quantitativo da unidade

Cenário	Localização	Tipo de perigo	Breve descrição
J1	Separador trifásico de primeiro estágio, módulo M10A, segundo piso	<i>Jet fire</i>	Vazamento horizontal na direção sul Taxa de vazamento médio, 3.1kg/s a zero, transiente
J2	Sistema de gás combustível, módulo M11A, primeiro piso	<i>Jet fire</i>	Vazamento horizontal na direção leste em direção ao módulo Taxa de vazamento médio, 3.1kg/s a zero, transiente.

2.3 Estimativa das Áreas Vulneráveis

ALOHA é um *software* registrado de modelagem de perigo pela CAMEO baseado em riscos químicos. Ele permite entrar em detalhes sobre o real e a potencialidade de liberações químicas, como H₂S, CH₄ e outros químicos. Também permite estimar as zonas de ameaça para os diferentes tipos de perigos utilizando dados do material.

Figura 3: Exemplo de Ameaça por Zona em Vapores Tóxicos



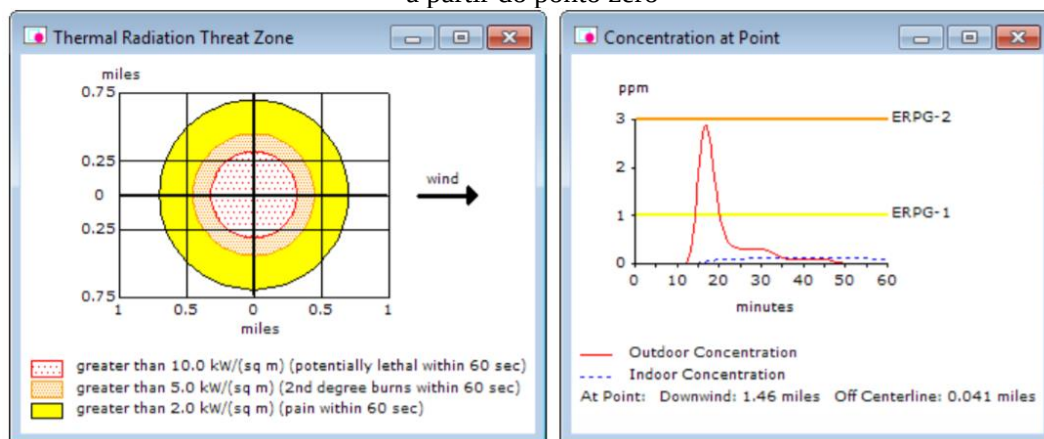
Fonte: Manual *Software* ALOHA, 2013.

A zona de ameaça é uma área onde o perigo (seja tóxico ou radiação térmica) tenha excedido um nível específico de risco. O ALOHA vai permitir mostrar as 3 zonas com os maiores perigos. Na simulação de radiação térmica é possível determinar qual a distância dentro do FPSO poderá ser atingida em caso de um incêndio ou explosão a partir de evento de vazamento de gás.

As simulações requerem a definição de dados atmosféricos para a modelagem. Abaixo segue uma breve descrição dos parâmetros necessários:

- Direção e velocidade do vento: utilizados para prever o quão rápido que o gás pode se dispersar pela atmosfera e qual a direção dessa dispersão;
- Rugosidade do terreno é uma medida do número e tamanho de pequenos obstáculos (chamados elementos rugosos) que uma nuvem química pode encontrar ao se dissipar sobre o terreno. Quanto mais rugoso o terreno maior a turbulência atmosférica.
- Cobertura de nuvem não é relevante para cenário de *jet fire* porém o *software* requereu a utilização de um valor, por isso empregou-se um valor intermediário dentre as opções disponíveis.
- Para representar a estabilidade atmosférica foi utilizada o quadro proposto por Pasquill que define seis classes de estabilidade: Classe A – extremamente instável; Classe B – instável; Classe C – ligeiramente instável; Classe D – neutra; Classe E – ligeiramente estável e Classe F – estável (Assael; Kakosimos, 2010).
- Altura de inversão é a altura na qual ocorre uma mudança abrupta na estabilidade atmosférica. Uma inversão pode acumular gases abaixo da altura de inversão causando concentração de gases atingir níveis maiores que o esperado na altura do piso.

Figura 4: Exemplo de zona de radiação térmica e as concentrações por tempo de concentração a partir do ponto zero



Fonte: Manual *Software ALOHA*, 2013

2.4 Frequência de Vazamento (IOGP)

O relatório IOGP 434-01 – Frequências de liberação de processo (*Risk Assessment Data Directory - Process Release Frequencies*) apresenta diversas frequências de vazamentos de equipamentos de processo. A base utilizada é de equipamentos de processos em topsides de instalações offshore que processam hidrocarbonetos.

Estão listados abaixo os diversos equipamentos que podem ser utilizados como base para definição da frequência de eventos considerando os equipamentos existentes na planta de processo.

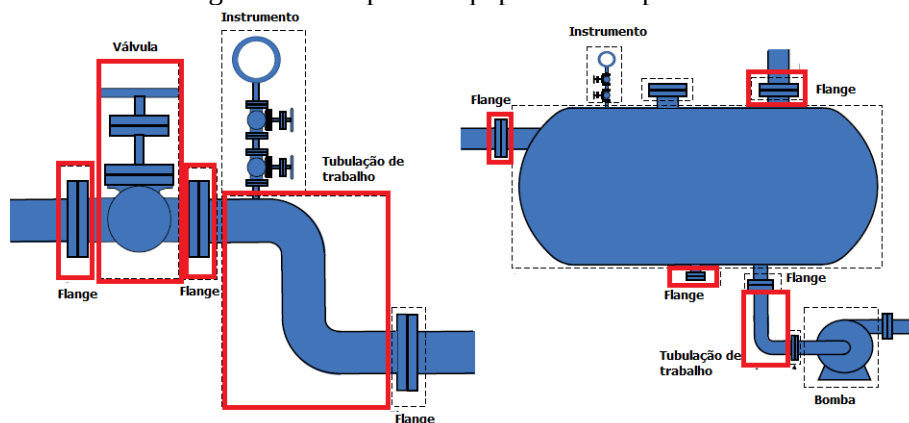
- Flanges
- Válvulas manuais
- Válvulas atuadoras
- Bombas de reciprocção
- Compressores de reciprocção
- Conexões de instrumentação
- Vasos de pressão de processo
- Bombas centrífugas
- Compressores centrífugos
- Filtros
- Tubulação flexível
- Degaseificadores
- Turbinas
- Trocadores de calores
- Tubulações de aço
- Vasos de pressão (Outros)
- Expansores
- Árvores de Natal
- Lançadores e recebedores de *pig*

Para o presente estudo foram utilizados somente dois equipamentos disponibilizados, sendo estes:

- Tubulações de trabalho;
- Vaso de pressão do processo.

Para um melhor entendimento, como exemplo, a Figura 5 abaixo traz em destaque alguns itens dos equipamentos que foram considerados com potencial de vazamento de gás durante o processo.

Figura 5: Exemplo do equipamento de processo



Fonte: IOGP 434-01, 2019

Esse relatório da IOGP ainda traz informações de vazamento a partir de furos ocorridos em tubulações de trabalho, essa informação é utilizada junto ao *Software* ALOHA para determinar a distância total do vazamento e quais áreas do FPSO poderão ser atingidas por um *jet fire* ou vazamento de gás.

Exemplo das informações que são utilizadas do relatório da IOGP: Na Tabela 4 é apresentada a frequência de ocorrência de diferentes diâmetros de furo em diferentes diâmetros de tubulação. A Tabela 5 apresenta frequências de furos em vasos de pressão de processo, incluindo separadores.

Tabela 4 – Frequência de ocorrência de furos para diferentes diâmetros de tubulações

Diâmetro do furo (mm)	2" Dia (50mm)	6" Dia (150mm)	12" Dia (300mm)	18" Dia (450mm)	24" Dia (600mm)	36" Dia (900mm)
1 até 3	1.5E-05	9.5E-06	8.6E-06	8.1E-06	7.7E-06	7.7E-06
3 até 10	6.4E-06	3.9E-06	4.2E-06	4.8E-06	4.9E-06	4.9E-06
10 até 50	2.8E-06	1.6E-06	2.1E-06	3.0E-06	3.3E-06	3.3E-06
50 até 150	1.0E-06	3.2E-07	5.2E-07	9.7E-07	1.2E-06	1.2E-06
>150	---	2.0E-07	4.6E-07	1.3E-06	1.7E-06	1.7E-06
Total	2.5E-05	1.6E-05	1.6E-05	1.8E-05	1.9E-05	1.9E-05

Tabela 5 – Frequência de furo em vasos de pressão de processo

Diâmetro do furo (mm)	De 50 até 150mm de Diâmetro	Maior que 150mm de Diâmetro
1 até 3	3.3E-04	3.3E-04
3 até 10	1.7E-04	1.7E-04
10 até 50	9.3E-05	9.3E-05
50 até 150	4.9E-05	2.5E-05
>150	----	2.4E-05
Total	6.5E-04	6.5E-04

Com a definição da frequência do evento de processo analisado no relatório IOGP 434-01 – Frequências de liberação de processo (*Risk Assessment Data Directory - Process Release Frequencies*) e a modelagem dos efeitos físicos, é possível realizar a quantificação do risco individual.

2.5 Cálculo do Risco

A análise quantitativa de riscos para uma unidade offshore utiliza uma técnica que considera frequência de eventos iniciadores, confiabilidade, disponibilidade e efetividade de sistemas de proteção, e a probabilidade de escape, evacuação e resgate. O resultado de uma análise de risco quantitativo é um valor provável de fatalidade, que é comparado a um critério de risco de fatalidade. Acidentes maiores possuem contribuição estimada a 65% do total de riscos de fatalidades em uma unidade offshore (Dries, 2004).

O cálculo dos riscos são apresentados na forma de risco individual por local específico (LSIR – *Location Specific Individual Risk*), risco individual por ano (IRPA – *Individual Risk per Annum*), e perda potencial de vida (PLL – *Potential Loss of Life*) e são detalhados nos itens 2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3 (Huinh & Biu, 2014).

2.5.1 Risco Individual por Local Específico (LSIR – *Location Specific Individual Risk*)

O LSIR indica o nível de risco em um local particular devido aos eventos de processo com hidrocarbonetos. Isso é o risco hipotético individual de quem está presente no local por 24 horas por dia e 365 dias por ano. Na realidade, pessoas não permanecem constantemente no local. De qualquer forma, o valor permite comparar as diferentes áreas na mesma base e ajudar estabelecer uma medida da área mais perigosa a partir do evento de vazamento de gás no processo.

As áreas do FPSO foram definidas na Tabela 1 Descrição dos módulos do FPSO XPTO, nesse processo o ALOHA vai poder determinar a distância da radiação térmica a partir do evento, dessa forma é calculado através da seguinte equação.

$$LSIR = \sum f * p \quad (Eq.1)$$

Onde:

f = Frequência de evento por ano;

p = Probabilidade de ocorrência

Σ = Soma de todos os eventos modelados;

Uma vez calculado o LSIR de cada área pode ser calculado o risco individual por ano. Para ser possível a realização do LSIR é necessário determinar a probabilidade de ocorrência, sendo para este estudo a probabilidade de ignição. O relatório IOGP 434-06 Probabilidades de Ignição (*Ignition probabilities*) de estabelece a probabilidade de ignição de hidrocarbonetos resultando em explosão e/ou *jet fire*.

A tabela 6 apresenta outras probabilidades que podem ser utilizadas de acordo com a taxa de liberação do gás inflamável.

Tabela 6: Tipo processo de gás offshore congestionado

Liberação de gás inflamável, vapores ou líquidos significantes acima do seu normal ponto de ebulição de uma planta de processo de gás ou de convés integrados: Aplicados onde o módulo é enclausurado e existe sistema ventilação mecânica ou é muito congestionado.

Taxa de Liberação (Kg/s)	Probabilidade de ignição
0.1	0,0011
0.2	0,0024
0.5	0,0068
1	0,0150
2	0,0174
5	0,0213
10	0,0247
20	0,0287
50	0,0350
100	0,0400
200	0,0400
500	0,0400
1000	0,0400

2.5.2 Risco Individual por Ano (IRPA – Individual Risk Per Annum)

O risco individual por ano é definido como a frequência em que cada indivíduo poderá sofrer alguma lesão fatal devido à exposição do risco em todos os perigos em um ano. IRPA ajuda a medir por que é essencialmente independente do número de pessoas expostas.

Valores de IRPA em um estudo de risco quantitativo representam o risco para o indivíduo, considerando o tempo que ele/ela permanece na unidade marítima (Dries, 2004).

O IRPA leva em conta os integrantes que trabalham no FPSO e terá com base o LSIR e o tempo despendido em cada área do FPSO. A expressão do cálculo de IRPA pode ser encontrado abaixo:

$$IRPA = \Sigma LSIR * N \quad (Eq.2)$$

Onde:

N = Proporção de tempo dos integrantes dispendem em cada área.

A proporção de tempo despendido de cada integrante em cada local é estimado de acordo com as funções dos integrantes. Com a definição do IRPA então é possível calcular o PLL (*Potential Loss of Life*).

2.5.3 Perda Potencial de Vida (PLL – Potential Loss of Life)

O PLL é definido como o número total de fatalidades esperados por ano considerando a população específica em cada local de trabalho. O PLL é apresentado na seguinte equação:

$$PLL = \sum IRPA * N \quad (Eq.3)$$

Onde:

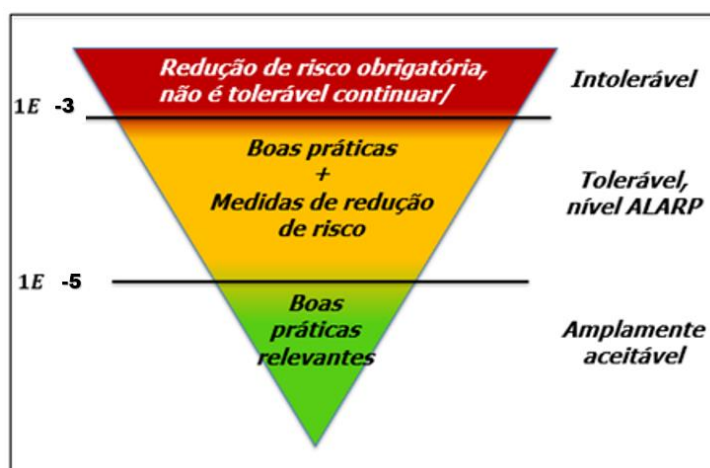
N = Número total de pessoas em rotação de escala de 14 x 14 dias.

2.5.4 Critério de aceitação de risco

Em avaliação de aceitabilidade dos níveis de risco calculados, os cálculos de LSIR, IRPA e PLL poderão determinar em quais níveis são aceitáveis em comparação do estado atual do processamento de gás com o novo inventário de gás na planta de processamento. Desde que o risco geral da instalação é dependente no tamanho e operação da instalação.

A figura 6 contempla o triângulo do nível de risco que é usado para avaliar a aceitabilidade do risco estimado e presente.

Figura 6 – Triângulo de nível de risco



Fonte: Huinh & Bui, 2014

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Cenário J1

O cenário de *jet fire* J1 é caracterizado pelo vazamento de gás metano (CH_4) através de um furo no primeiro separador trifásico do FPSO localizado no módulo M10A/B. Foram aplicados os parâmetros da análise de risco da unidade para simulação no *software* ALOHA do alcance do efeito físico de *jet fire*, conforme dados compilados nas Tabelas 7, 8 e 9.

Tabela 7 - Dados Atmosféricos para o cenário J1

Velocidade do vento	7 m/s
Direção do Vento	Nordeste
Altura de medição (vento)	10 m
Rugosidade do terreno	Mar aberto
Cobertura de Nuvem	3
Classe de Estabilidade (Pasquill-Turner)	D (neutra)
Temperatura do ar	23,5°C
Altura de Inversão	Sem inversão
Umidade do ar	76%

Tabela 8 - Dado do fluido para o cenário J1

Fluido	Metano
Pressão do Fluido	10,8562 atm
Temperatura do Fluido	120°C

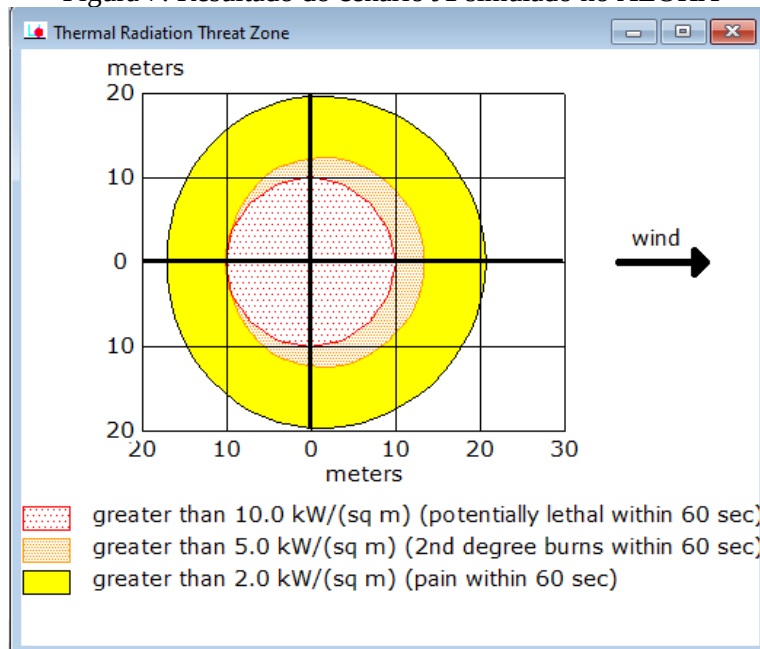
Tabela 9: Dados do separador trifásico

Diâmetro do tanque	16.5 ft
Comprimento do tanque	69 ft
Temperatura no interior do tanque	120 °C
Pressão no interior do tanque	10,8562 atm
Diâmetro do furo	5 cm

Com o input dos parâmetros no ALOHA, obteve-se o resultado de *jet fire* ilustrado na Figura 7. Nela, a área amarela demarcada representa o alcance do efeito físico para níveis de radiação térmica na faixa de 2.0kW/m^2 indicada como zona de dor; a laranja, 5 kW/m^2 , que representa a zona onde ocorrem queimaduras de 2º grau; e a vermelha, 10 kW/m^2 representando a área letal para pessoas que permanecerem dentro desta zona por mais de 60 segundos.

No cenário obtido pode-se observar que o alcance máximo da radiação térmica é de, aproximadamente, 20 metros na direção do vento. Sendo que o raio da área letal é de, aproximadamente, 10 metros desde o centro do vazamento de gás.

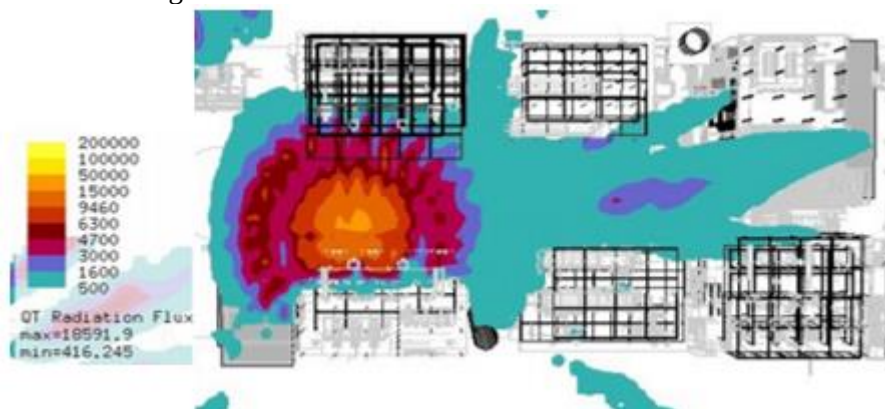
Figura 7: Resultado do cenário J1 simulado no ALOHA



Fonte: Autores, 2021.

O resultado da Figura 7 foi comparado com o da Figura 8, proveniente do relatório original, a qual ilustra as zonas de radiação térmica no módulo M10 A/B do FPSO após iniciado o *jet fire*.

Figura 8: Resultado do cenário J1 simulado em CFD



Fonte: FPSO XPTO Quantitative Risk Analysis, 2021.

Neste cenário, observou-se, num primeiro momento, uma semelhança no alcance dos efeitos físicos. Esta semelhança deve-se ao fato do local em questão ser pouco congestionado. Porém, não é possível estabelecer correlação entre as quantidades de

energia liberadas em forma de fluxo térmico, uma vez que o ALOHA fornece apenas uma noção da ordem de grandeza dos efeitos térmicos, ou seja, não é possível estimar o quão acima de 10kW/m² está a região potencialmente letal, em vermelho na Figura 7.

3.2 Cenário J2

O cenário J2 avaliou o alcance físico de um *jet fire* assumindo o rompimento de uma tubulação de 6 polegadas que transfere o gás CH₄ do separador trifásico para a caldeira. Para realizar a simulação deste cenário, foram inseridos os dados das Tabelas 10, 11 e 12.

Tabela 10: Dados Atmosféricos para o cenário J2

Velocidade do vento	7 m/s
Direção do Vento	Nordeste
Altura de medição (vento)	10 m
Rugosidade do terreno	Mar aberto
Cobertura de Nuvem	3
Classe de Estabilidade (Pasquill-Turner)	D (neutra)
Temperatura do ar	23.5°C
Altura de Inversão	Sem inversão
Umidade do ar	76%

Tabela 11: Dados do Fluido para o cenário J2

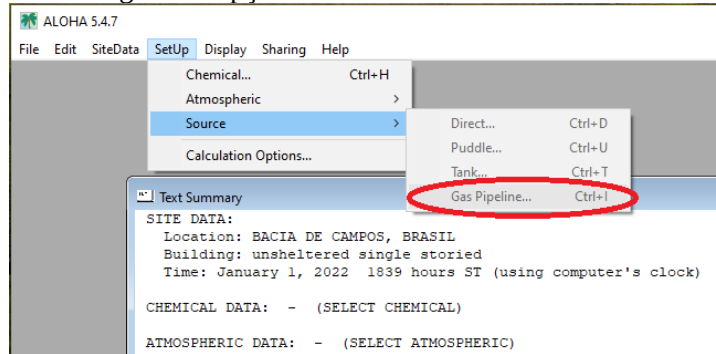
Fluido	Metano
Pressão do Fluido	10,8562 atm
Temperatura do Fluido	40°C

Tabela 12: Dados da tubulação

Diâmetro da linha de gás	6 in
Comprimento da linha de gás	47
Pressão na linha	4,9346 atm
Temperatura na linha	40 °C
Diâmetro do furo	6 in

É importante ressaltar que, para este cenário de rompimento de tubulação, o *software* ALOHA fornece uma opção específica para realizar a simulação, conforme ilustrado na Figura 9. Uma vez selecionada esta opção, o *software*, em dado momento, solicita que seja selecionada como está a extremidade da tubulação que não foi rompida: se está conectada a uma fonte infinita ou se está fechada. A tela com esta opções está representada na Figura 10.

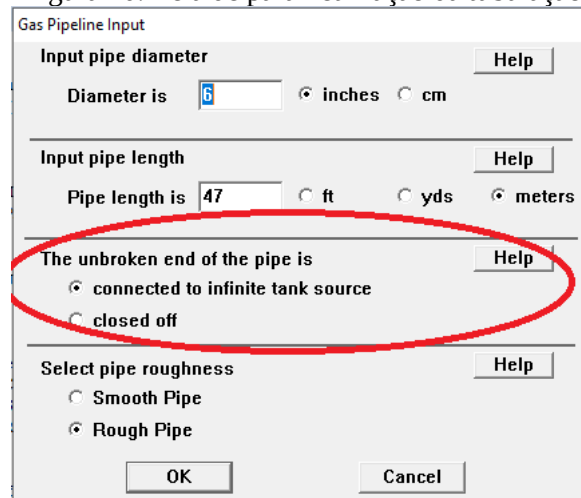
Figura 9: Opções de modelo de fonte emissora



Fonte: Autores, 2021.

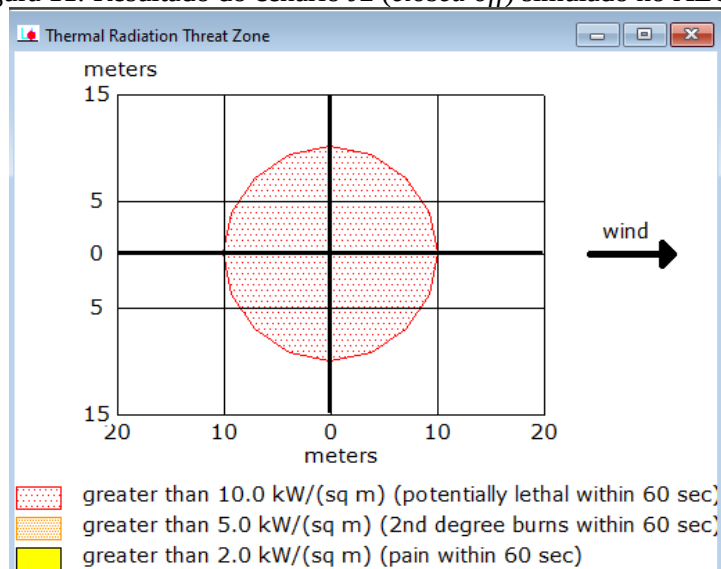
Esta opção fez toda a diferença nos resultados obtidos para a simulação do cenário J2, pois, inicialmente, foi considerado que a extremidade intacta da tubulação estava conectada a uma válvula de pressão que se fecharia logo o vazamento de gás fosse identificado (opção *closed off*). Mas, com essa consideração, o resultado obtido foi muito diferente do resultado da simulação original, conforme ilustra as Figuras 11 e 12.

Figura 10: Tela de parametrização da tubulação



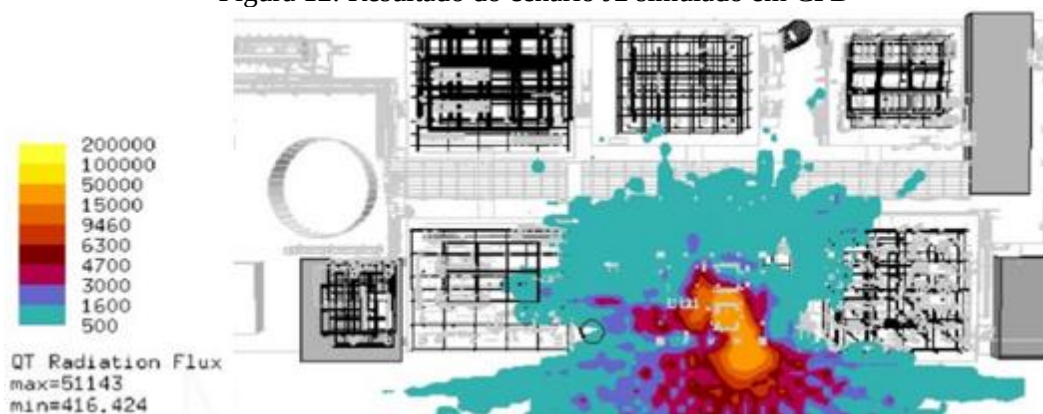
Fonte: Autores, 2021.

Figura 11: Resultado do cenário J2 (*closed off*) simulado no ALOHA



Fonte: Autores, 2021.

Figura 12: Resultado do cenário J2 simulado em CFD

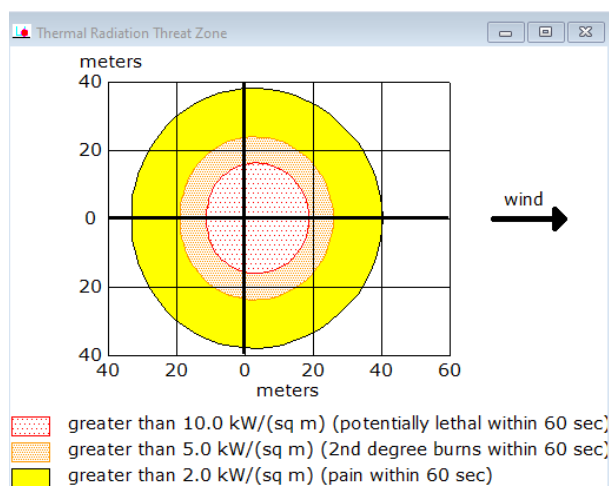


Fonte: FPSO XPTO *Quantitative Risk Analysis*, 2021.

Fica evidente a total discrepância entre os resultados, uma vez que o cenário J2 *closed off* indica somente uma área potencialmente letal de 10 metros de raio, excluindo as demais áreas de perigo. Porém, uma vez analisados os dados numéricos fornecidos pelo ALOHA, foi identificado que a opção *closed off* gerou uma situação que não é possível num processo real, pois o *software* considerou que o *jet fire* seria alimentado somente pelo gás contido em 47 metros de tubulação (dados de simulação), que na prática equivale a dizer que a válvula de pressão atuaria fechando a linha imediatamente após o seu rompimento. Com esta consideração realizada pelo ALOHA o tempo de queima seria de apenas 20 segundos, o que não condiz com o tempo de queima do estudo original, que é de, aproximadamente, 15 minutos. Observado isso, buscou-se alterar o tempo de vazamento do gás para este cenário, porém o *software* não fornecia esta opção.

Desta forma, a fim de contornar este problema, foi utilizada a outra opção disponível, onde considera-se a extremidade da tubulação conectada a um tanque que funciona como fonte infinita (*infinite tank source*). O novo resultado alcançado está ilustrado na Figura 13.

Figura 13: Resultado do cenário J2 (*infinite tank source*) simulado no ALOHA



Fonte: Autores, 2021.

Com esse ajuste, pode-se observar o aumento do alcance da área letal, além da indicação de 3 áreas perigosas, que podem causar queimaduras de 2º grau e dor. Porém, nesta simulação o *software* fixou o tempo de vazamento em 1h, o que ainda é bem diferente do tempo de vazamento do estudo original. Aqui também não foi possível alterar o tempo de vazamento.

Além disso, as diferenças observadas no alcance dos efeitos físicos entre as simulações desse cenário, quando comparadas somente em 2D, devem-se principalmente ao fato do ALOHA não considerar nem a direção do vazamento nem os efeitos do congestionamento da área ao redor.

3.3 Resultados e discussão da Avaliação Quantitativa

Determinado o raio do *jet fire* pela modelagem em 2-D do *software* ALOHA, foi possível determinar quais áreas seriam atingidas da plataforma e quantas pessoas estariam expostas caso ocorresse um dos eventos modelados anteriormente.

3.3.1 LSIR: Risco Individual Específico do Local

Para determinar o LSIR foi utilizada a Equação 1, porém com os valores a partir de base histórica de dados do relatório IOGP 434-01 – Frequências de liberação de processo (*Risk Assessment Data Directory - Process Release Frequencies*). Para o cenário J1 foi considerado um furo de 5cm em um separador trifásico representada pela frequência por ano de $9,30\text{E-}05$. Para o cenário J2 onde, há ruptura ou desconexão total de uma tubulação de 6” é apresentado uma frequência de ocorrência de $2,00\text{E-}07$ por ano. Para o LSIR é necessário uma probabilidade de ignição; utilizando o relatório IOGP 434-06 – Probabilidades de Ignição (*Ignition probabilities*), traz a probabilidade de acordo com o processo e a taxa de liberação. Para o presente estudo foram utilizadas para o cenário J1 de um furo de 5cm a probabilidade de ignição de 0.015. Para o cenário J2 onde foi determinado uma desconexão ou ruptura total de uma tubulação de 6” foi considerado a probabilidade de 0.04. Para determinação dessas probabilidades foram consideradas a possível taxa de liberação dos gases para cada cenário. Os resultados de LSIR são apresentados na tabela 13.

Tabela 13: Resultados do LSIR

LSIR J1	1,40E-06
LSIR J2	8,00E-09
LSIR TOTAL	1,41E-06

Os resultados de LSIR para os dois cenários descritos são considerados aceitáveis para trabalhadores estarem expostos durante seu dia-a-dia de trabalho, conforme critério de aceitação apresentado.

3.3.2 IRPA: Risco Individual por Ano

Para determinar o risco individual por ano foi utilizada a Equação 2 considerando o tempo exposto de pessoas aos cenários. As tabelas 14 e 15 trazem as equipes que estão expostas aos eventos J1 e J2 e o respectivo cálculo do IRPA. Para considerar o tempo de exposição de cada grupo de trabalhadores foi avaliado o tempo que seria necessário da presença do grupo na área de processos do FPSO XPTO, como exemplo, o grupo de trabalhadores da parte de processo e a equipe técnica são os grupos de funções que mais apresentam tempo de exposição na área de processo. Para consideração dessa análise do tempo de exposição foi considerado rotação de equipes de 14dias x 14 dias.

Cenário J1

Tabela 14: Resultados do IRPA J1

Equipes	Qtd de Pessoas	Horas expostas J2	Dias por ano exposto	Proporção de exposição J2	IRPA
Pessoal de processo	7	6	365	0,25	3,49E-07
Equipe Técnico	8	6	365	0,25	3,49E-07
Outros integrantes	5	4	180	0,166667	1,15E-07
IRPA J1					8,12E-07

Cenário J2

Tabela 15: Resultados do IRPA J2

Equipes	Qtd de Pessoas	Horas expostas J1	Dias por ano exposto	Proporção de exposição J1	IRPA
Pessoal de processo	7	6	365	0,25	2,00E-09
Equipe Técnico	8	6	365	0,25	2,00E-09
Marítimos	2	2	365	0,083333	6,67E-10
Gerência e hotelaria	1	1	182	0,020776	1,66E-10
Outros integrantes	20	4	182	0,083105	6,65E-10
IRPA J2					5,50E-09

Dessa forma, o resultado total da avaliação do risco individual por ano é dos cenários J1 e J2 foi de 8,12E-07.

Os resultados de IRPA combinados para os dois cenários descritos são considerados aceitáveis para trabalhadores estarem expostos durante seu dia-a-dia de trabalho, conforme critério de aceitação apresentado.

3.3.3 PLL: Perda Potencial de Vida

Para calcular o PLL, foi utilizado o resultado da soma de IRPA dos cenários J1 e J2, e separado por grupo de trabalhadores expostos, representados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente. Para determinar o PLL foi utilizado a quantidade de pessoas que estão expostas às ocorrências dos cenários J1 e J2.

Cenário J1

Tabela 16: Resultados do PLL J1

Equipes	Qtd de Pessoas	PLL por grupo exposto
Pessoal de processo	7	6,98E-06
Equipe Técnico	8	6,98E-06
Outros integrantes	5	2,29E-06
PLL Total J1		1,62E-05

Cenário J2

Tabela 17: Resultados do PLL J2

Equipes	Qtd de Pessoas	PLL por grupo exposto
Pessoal de processo	7	7,60E-08
Equipe Técnico	8	7,60E-08
Marítimos	2	2,53E-08
Gerência e hotelaria	1	6,32E-09
Outros integrantes	20	2,53E-08
PLL Total J2		2,09E-07

Com um PLL total para área de processo considerando somente 2 cenários, determinados no estudo de HAZID, e levando em consideração a distância do raio do *jet fire* e o PLL considerando o cenário J1 e J2 de 1,65E-05 por ano, esse valor se encontra na zona tolerável, nível ALARP, conforme critério de aceitação apresentado e estes foram comparados com resultados do PLL do estudo de risco da unidade na Tabela 18.

Tabela 18: Comparativo do PLL

Cenário do Estudo	Resultado do PLL	Cenário comparativo	PLL Comparativo
J1	1,62E-05	Primeiro estágio do Separador	5,13E-05
J2	2,09E-07	Segundo estágio do Separador	3,23E-07

Os resultado dos cenários J1 e J2 calculados foram considerados bem próximos dos respectivos resultados do estudo de risco (31% e 64%, respectivamente) para as áreas do primeiro e segundo estágios do separador trifásico. Considerando que os cenários comparativos contém as probabilidades agregadas de vazamentos em válvulas, tubulações, cascos e flange (Figura 5); e o cenário calculado considerava apenas uma dessas probabilidades, era esperado que o resultado calculado fosse uma fração do resultado do estudo de risco.

4. CONCLUSÕES

Sobre a viabilidade do emprego do *software* ALOHA no estudo de efeitos físicos em ambientes *offshore*, concluiu-se que o *software* não é adequado para esta finalidade. Uma vez que possui limitações significativas, tais como: não considerar a propagação do efeito de forma tridimensional; não levar em consideração a direção do vazamento; e não considerar os efeitos do congestionamento de área. Além disso, o ALOHA não possui precisão para fornecer, de modo seguro e assertivo, a quantidade de fluxo de calor dentro das zonas fornecidas pela simulação.

A metodologia de cálculo do PLL através da determinação dos valores de LSIR e IRPA, foi empregada de forma limitada quando comparada com o estudo original, pois foram considerados, neste estudo, apenas 2 cenários acidentais e não a totalidade dos cenários possíveis. Essa limitação foi causada pelo fato do ALOHA não conseguir simular os outros cenários contidos no estudo original, por exemplo, outros cenários de *jet fire* em condições diferentes do cenário do J1 e J2; cenários de *pool fire* e dispersão em nuvem.

Embora as frequências identificadas a partir dos cálculos LSIR, IRPA e PLL apresentarem valores considerados aceitáveis, continua sendo necessária, para uma correta e rigorosa avaliação do PLL, a integração dos resultados de cenários adicionais à análise de riscos total da unidade.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente aos nossos familiares, que nos apoiaram neste período de ausência, para que pudéssemos nos especializar.

Ao SENAI CETIQT pela disponibilização de excelentes profissionais, tanto os professores, quanto os tutores, onde agregaram valor em nossa formação e no apoio que permitiram o ambiente adequado para a realização do presente curso.

A nossa orientadora Marta Cristina Picardo, pelo suporte fornecido durante a elaboração deste trabalho, que contribuíram para a melhoria dos resultados e possibilitando sua conclusão satisfatória.

6. BIBLIOGRAFIA

- ASSAEL, Marc J.; KAKOSIMOS, Konstantinos E.. Fires, Explosions, and Toxic Gas Dispersions: effects calculation and risk analysis. Boca Raton: Crc Press, 2010.
- CCPS - CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis. 2. ed. New York: Wiley-Interscience, 2000.
- CCPS - CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY. Guidelines for Enabling Conditions and Conditional Modifiers in Layer of Protection Analysis. New York: Wiley-Interscience, 2014.
- CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph L. SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS: fundamentos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015.
- DNV GL – FPSO XPTO Quantitative Risk Assessment review report, 2021
- DRIES, Jake W.J. van den. Risk management of an offshore installation: a case study for floating production storage and offloading facility (FPSO) Fluminense. Brazil: N. p., 2004. Web.
- HAUGEN, Stein; RAUSAND, Marvin. RISK ASSESSMENT. Theory, Methods and Applications, Second Edition, 2020.
- HUYNH, T., & BUI, V. (2014). Application of quantitative risk assessment on offshore oil & gas industry. *Science and Technology Development Journal*, 17(3), p. 62-68 2014.
- IOGP - International Association of Oil & Gas Producers (org.). RISK ASSESSMENT DATA DIRECTORY - Process Release Frequencies: report 434-01. 1.1, 2019.
- IOGP - International Association of Oil & Gas Producers (org.). RISK ASSESSMENT DATA DIRECTORY - Ignition Probabilities: report 434-06. 1.1, 2019.
- IOGP - International Association of Oil & Gas Producers (org.). RISK ASSESSMENT DATA DIRECTORY - Guide to finding and using reliability data for QRA: report 434-20. 1.0, 2019.
- JONES, R., W. LEHR, D. SIMECEK-BEATTY, R. MICHAEL REYNOLDS. 2013. ALOHA® (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4: Technical Documentation. U. S. Dept. of Commerce, NOAA Technical Memorandum NOS OR&R 43. Seattle, WA: Emergency Response Division, NOAA. 96 pp
- Offshore Risk Assessment Vol 1 - Principles, Modelling and Applications of QRA Studies, Third Edition, 2014.
- PASQUILL, F. The Estimation of the Dispersion of Windborne Material. *Meteorological Magazine*. v.90. 1961. p. 33-49.
- SHABA, Kehinde; HUNTER, Mark. DNV-GL - Introduction to QRA Webinar. Macaé, 2017.