

UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS - UNISINOS
UNIDADE ACADÊMICA DE GRADUAÇÃO
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENGENHARIA DE SEGURANÇA DO
TRABALHO

PAULA ALDROVANDI

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE TANQUE DE LÍQUIDO INFLAMÁVEL
CONFORME PADRÕES CETESB

São Leopoldo

2018

PAULA ALDROVANDI

**ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE TANQUE DE LÍQUIDO INFLAMÁVEL
CONFORME PADRÕES CETESB**

Artigo apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho, pelo Curso de Especialização em Eng. de Segurança do Trabalho da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS

Orientador: Prof. Esp. Narciso Ruzzarin

São Leopoldo

2018

ANÁLISE DE VULNERABILIDADE DE TANQUE DE LÍQUIDO INFLAMÁVEL CONFORME PADRÕES CETESB

Paula Aldrovandi*

Narciso Ruzzarin**

Resumo: O histórico mundial de acidentes envolvendo produtos perigosos como líquidos e gases inflamáveis, combustíveis ou tóxicos demonstram que os danos causados podem ir além de prejuízos financeiros as empresas, podendo ultrapassar os limites do empreendimento, ocasionando danos irreparáveis ao meio ambiente e a saúde da população circunvizinha. A fim de reduzir e gerenciar o risco causado por determinadas empresas os órgãos ambientais como a CETESB-SP estabelecem critérios de tolerabilidade, aos quais o risco estimado será comparado. Esta avaliação do risco é apresentada na forma de estudo de análise de riscos (EAR). A estimativa dos efeitos e a análise de vulnerabilidade constituem uma das etapas do EAR. Desta forma, o presente trabalho teve como objetivo a realização da análise de vulnerabilidade para o cenário de grande vazamento de n-Hexano, através do software Riskan® para os efeitos de explosão em nuvem e incêndio em poça que apresentaram a probabilidade de ocorrência segundo árvore de eventos de 18,7% e 6,5%, respectivamente.

Palavras-chave: Vulnerabilidade. Inflamável. Análise de Risco.

* Engenheira Química e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho.

** Engenheiro Químico, Especialista em Docência para Nível Superior e Especialista em Engenharia de Segurança do Trabalho.

1 INTRODUÇÃO

Em 2015 o Porto de Santos em São Paulo foi cenário de um grande incêndio envolvendo seis tanques de líquido inflamável. O incêndio que levou nove dias para ser completamente extinto teve como consequência fatores que vão além da perda econômica.

Segundo Laudo Pericial Criminal, o efluente gerado no combate ao incêndio causou a morte de mais de nove toneladas de peixes, impactando também a flora devido à radiação do calor, além dos poluentes atmosféricos gerados na queima, causando temor a população local. (BRASIL, 2015).

Frente aos riscos gerados por empreendimentos que envolvam armazenamento, processo e transporte de líquidos e gases inflamáveis, combustíveis ou tóxicos a análise de riscos se apresenta como uma ferramenta de grande importância para a gestão de segurança. Através dela, cenários de risco como o ocorrido no terminal da Ultracargo em 2015 podem ser identificados antecipadamente, sendo implementadas salvaguardas que tornem a probabilidade deste evento ocorrer menor, reduzindo o risco da instalação.

Os órgãos ambientais tanto internacionais (EPA, HSE, etc.) como os nacionais (CETESB, FEPAM,) buscam identificar empreendimentos que possuam potencial para gerar risco tanto ao meio ambiente como as populações próximas a eles. Estes órgãos governamentais estabelecem critérios de tolerabilidade ao risco e diretrizes para a elaboração do Programa de Gerenciamento de Risco (PGR) dos empreendimentos.

A análise de vulnerabilidade é uma análise de risco quantitativa utilizada para determinar a extensão do dano causado as pessoas, a instalação e ao meio ambiente através de modelos matemáticos, baseados em limites de tolerância para os diferentes efeitos de sobrepressão, radiação térmica e toxicidade.

O presente artigo tem como objetivo apresentar a análise de vulnerabilidade de um tanque de n-Hexano e verificar o atendimento dos critérios de tolerabilidade de riscos definidos pelo órgão ambiental do estado de São Paulo - CETESB.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No Brasil a Norma Regulamentadora - NR 20 determina requisitos mínimos para as atividades de extração, produção, armazenamento, transferência, manuseio e manipulação de líquidos inflamáveis e combustíveis, no que concerne a gestão da saúde e segurança dos trabalhadores.

Para a prevenção e controle de vazamentos, derramamentos, incêndios, explosões e emissões fugitivas a NR-20 estabelece que o empregador deve elaborar um plano de prevenção e controle afim de minimizar os riscos e diminuir as consequências provenientes destes cenários. Assim como elaborar um Plano de Resposta as Emergências da Instalação, onde deverão ser estabelecidos possíveis cenários de emergência (BRASIL, 2017).

Estes cenários de emergência são definidos através de análises de risco, que tem como objetivo identificar os perigos do empreendimento e avaliar os riscos que eles expõem a comunidade (EPA, 1987). Alguns exemplos de metodologias de análise de risco são: Checklist, Hazid, Hazop, What IF, APR, entre outras (CCPS, 2003).

Acidentes que envolvem líquidos combustíveis ou inflamáveis normalmente desencadeiam eventos de incêndio ou explosão. Estes eventos podem se caracterizar por diferentes tipos: jato de fogo, *bleve*, incêndio em poça e explosão em nuvem (USEPA, 1987).

Para que ocorra um incêndio ou uma explosão, além da existência de material inflamável, combustível ou reativo e da ocorrência de um evento iniciador como a falha de um equipamento ou um erro humano, um terceiro fator intermediário deve ocorrer dando sequência ao acidente. Segundo CCPS (1996), existem dois tipos de fatores intermediários, os que propagam o evento gerando consequências mais severas, (como exposição a fontes de ignição ou falha nos detectores) e os que mitigam, evitando que o incêndio atinja proporções maiores, como por exemplo, contenção de derramamento, uso de equipamentos para área classificada, detecção e acionamento dos sistemas de emergência.

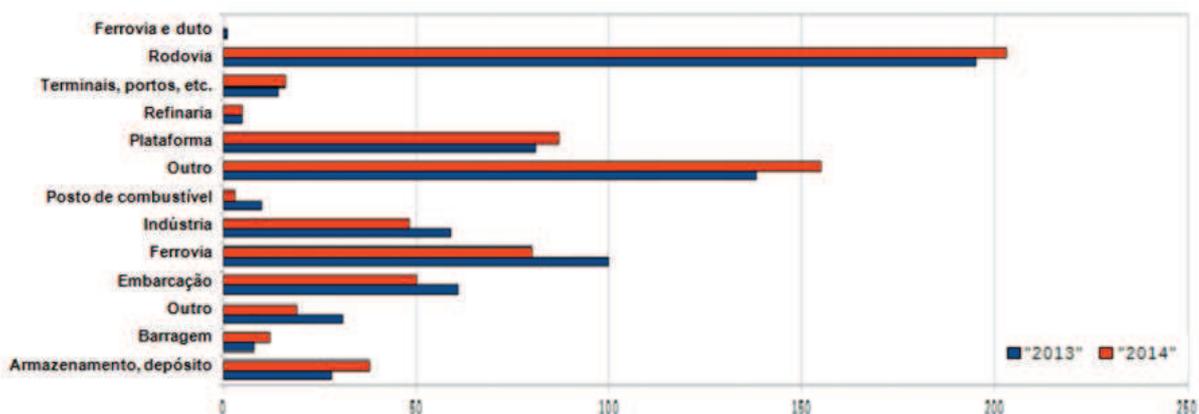
A abordagem da proteção contra incêndios nas empresas geralmente é resultado da conformidade entre normas, requisitos de seguradora, práticas do setor ou procedimentos da empresa (CCPS, 2003).

2.1 Acidentes ambientais envolvendo combustíveis

Conforme IBAMA (2015) a maior quantidade de registros de acidentes ambientais entre os anos de 2013 e 2014 foram registradas nas rodovias. Sendo predominante nos estados de São Paulo e Minas Gerais, que apresentam a maior malha viária do país. Segundo LIEGGIO JUNIOR (apud IBAMA, 2007). O transporte majoritário da produção dos setores químicos, petroquímicos e de refino de petróleo no Brasil é realizado por rodovias.

O gráfico apresentado na Figura 1, mostra um aumento de acidentes ambientais em 2014 envolvendo produtos químicos, não só para as rodovias, como também para plataformas e locais de armazenamento e depósito, comparado ao ano anterior. (IBAMA, 2015)

Figura 1: Quantitativo de acidentes registrados por local de ocorrência referentes aos anos de 2013 e 2014.



Fonte: Relatório de Acidentes Ambientais 2014 (IBAMA, 2015).

O item “outros”, apresentado no gráfico da Figura 1, representa os acidentes ocorridos em local não especificado, assim como acidentes que envolvam manchas de óleo de origem desconhecida e mortandade de peixes, sem causa determinada.

O acidente ocorrido no terminal da Ultracargo, no porto de Santos-SP em 2015, assim como outros acidentes mundiais tão graves quanto, como o incêndio no terminal de armazenamento de petróleo em Hertfordshire (Buncefield – Reino Unido) em 2005, são exemplos da importância de uma boa gestão de risco, principalmente em empresas que processam, manuseiam e armazenam grandes quantidades de material inflamáveis e combustíveis.

Segundo os laudos mencionados na denúncia pelo Ministério Público Federal (BRASIL, 2015), o acidente no Porto de Santos-SP teve como causa o fenômeno *BLEVE – Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* (Explosão de Vapor em Expansão de Líquido em Ebulição) de uma das bombas do parque de tancagem, devido à operação da mesma com as linhas de sucção e descarga bloqueadas, ocasionando ruptura de sua carcaça e liberação de combustível em autoignição.

Devido à ineficiência do sistema de combate a incêndio e falha nos procedimentos de segurança o fogo tomou proporções maiores e se alastrou para seis tanques que armazenavam gasolina e etanol. O incêndio foi controlado após nove dias, tendo como consequência à mortandade de peixes, danos a vegetação do mangue e prejuízos a saúde pública.

Conforme GT- CREA/SP (2015), empresas desse porte representam muito para o país devido à geração de receitas e empregos, porém também possuem potencial para gerar impactos negativos ao meio ambiente urbano e natural, caso não sejam adequadamente projetadas, localizadas, instaladas, operadas e mantidas.

Uma das principais causas de acidentes é a falta de percepção dos riscos pelos empregados, sendo considerado uma falha na gestão de segurança, cuja responsabilidade cabe aos supervisores das frentes de trabalho (GT- CREA/SP, 2015).

Segundo Kontogiannis; Leva e Balfe (2016), a gestão de mudanças (MOC) do termo inglês *Management of Change*, é um aspecto importante para o gerenciamento dos riscos de processos pois a avaliação de riscos é um processo cíclico que envolve avaliação de barreiras para decidir se o risco residuais são toleráveis, avaliando-se assim a eficácias das barreiras. Esse processo envolve além de custos e benefícios, a avaliação de novos riscos que podem ser gerados por novas intervenções e mudanças de segurança.

Os danos causados por acidentes dessa proporção não atingem somente os limites das empresas e seus empregados como também o meio ambiente e as comunidades próximas.

A fim de avaliar as proporções dos danos que uma empresa pode representar tanto para a comunidade como para o meio ambiente os órgãos ambientais do país como CETESB - SP, FEPAM – RS e INEA-RJ assim como os órgãos internacionais EPA-USA, HSE-UK, entre outros, estabelecem diretrizes e determinam a necessidade de Estudo de Análise de Riscos e do Programa de Gerenciamento de Riscos, para

empreendimentos potencialmente geradores de acidentes (CETESB, 2011) (FEPAM, 2016) (USEPA, 1987) (HSE, 2015).

2.2 Legislação de Análise de Riscos no Brasil

Segundo Reis (2007), a legislação brasileira não possui uma diretriz única que tange o entendimento e uniformidade quanto à obrigatoriedade, escopo, detalhamento e profundidade dos Estudos de Análises de Risco no país. Os estados em que predomina a exigência de EAR são SP e RS. Sendo que cada um possui sua norma para elaboração do Estudo (CETESB, 2011), (FEPAM, 2016).

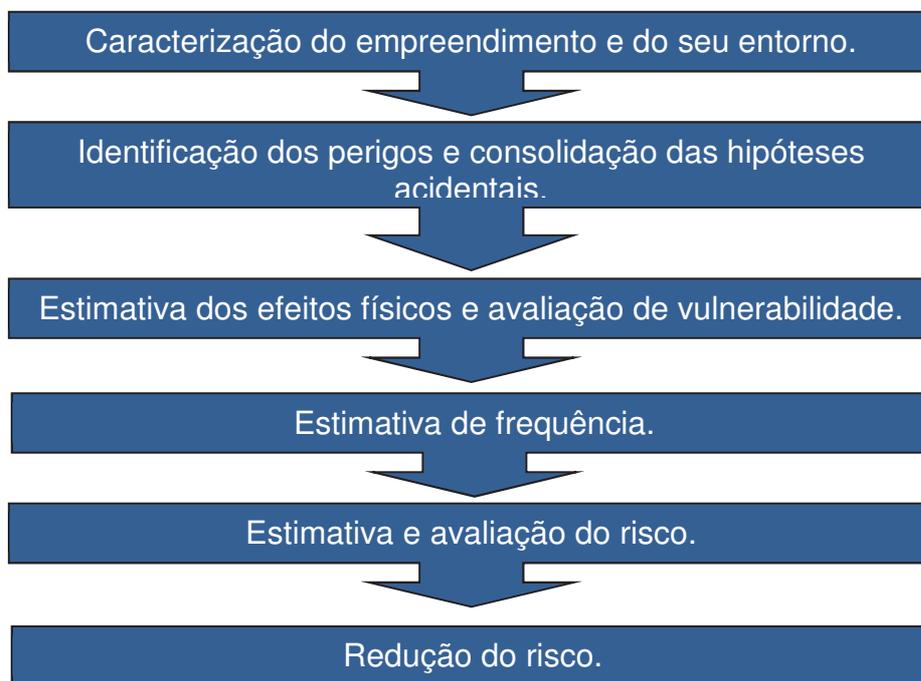
Segundo CETESB (2011), os fatores que influenciam o risco de um empreendimento são a quantidade e periculosidade das substâncias manipuladas e armazenadas e a vulnerabilidade da região.

A CETESB define que a necessidade de Estudo de Análise de Riscos (EAR) ou do Plano de Gerenciamento de Riscos (PGR) para os empreendimentos, seja determinada conforme a classificação das substâncias presentes no empreendimento, relacionada com a capacidade de armazenamento dos tanques e com a respectiva distância de referência (d_r). Nesse contexto a distância de referência é definida como a distância a partir da qual não é esperado que ocorram danos significativos a população devido à ocorrência do cenário acidental.

A distância da população até o risco (d_p) é comparada com a distância de referência. Quando houver a presença de mais de 25 pessoas dentro dos limites determinados pela distância de referência (d_r) torna-se obrigatório a realização do EAR e PGR, caso contrário o empreendedor fica dispensado da elaboração do EAR, devendo apresentar apenas o PGR. (CETESB, 2011)

As etapas que constituem um Estudo de Análise de Riscos (EAR) de acordo com a CETESB (2011) estão apresentadas na Figura 2.

Figura 2: Etapas do EAR segundo CETESB.



Nesse contexto, este artigo pretende realizar a etapa de análise de vulnerabilidade e estimativa dos efeitos físicos conforme os critérios determinados na Norma P4.261 - CETESB (2011).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os efeitos físicos para análise de Vulnerabilidade e Risco Social e Individual foram estimados por simulação no software Riskan® de forma a quantificar estes efeitos em termos de radiações térmicas e sobre pressões.

Os dados avaliados na simulação de cada efeito estão apresentados nos tópicos abaixo e foram retirados da Norma CETESB P4.261 (2011).

3.1 Cenário de estudo

O n-Hexano é um líquido inflamável, com ponto de fulgor de -22 °C, com limite inferior de inflamabilidade (LII) de 1,1% e limite superior de inflamabilidade (LSI) de 7,5%. (NIOSH, 2018).

A análise de vulnerabilidade foi realizada para a hipótese de acidente causada por um grande, médio e pequeno vazamento de n-Hexano, devido à ruptura, fissura ou furo em flanges, válvula, tubulação ou bomba de um tanque estacionário vertical, tendo como consequência uma explosão em nuvem ou um incêndio em poça, conforme apresentado no Quadro 1.

Quadro 1: Descrição das hipóteses acidentais do estudo

Nº	Hipótese acidental (Evento iniciador)	Simulação
H1	Grande liberação de n-Hexano devido a ruptura total na linha de 8" desde o tanque até a sucção da bomba de carregamento rodoviário.	Explosão em nuvem
H2		Incêndio em poça
H3	Média liberação de n-Hexano devido a fissura de 3" na linha de 8" desde o tanque até a sucção da bomba de carregamento rodoviário.	Explosão em nuvem
H4		Incêndio em poça
H5	Pequena liberação de n-Hexano devido a furo de 1/2" na linha de 8" desde o tanque até a sucção da bomba de carregamento rodoviário.	Explosão em nuvem
H6		Incêndio em poça

Fonte: Elaborado pela autora

O tanque de n-Hexano possui 25 m de diâmetro e 16 m de altura, com uma capacidade de armazenamento de 7.500 m³ e está localizado no interior de uma bacia de contenção com extensão de 48 m x 100 m. O tanque possui teto fixo com selo flutuante a fim de minimizar a presença de vapores na superfície do líquido.

3.2 Caracterização do entorno e distribuição populacional.

O empreendimento em estudo está localizado em uma área industrial, distante 13 km da área urbana. Próximo a uma rodovia de escoamento de produção para todo Brasil.

Por ser uma zona industrial a população vizinha ao empreendimento é basicamente constituída pelos empregados das empresas instaladas na região.

A empresa possui operação 24 horas por dia de segunda a domingo.

Figura 3: Planta de situação do tanque de n-Hexano



3.3 Condições meteorológicas

As condições meteorológicas como velocidade do vento, umidade relativa do ar, estabilidade atmosférica influenciam diretamente na extensão de dispersão dos gases e vapores. A estabilidade atmosférica está correlacionada à velocidade do vento e quantidade de luz solar, dessa forma durante o dia a instabilidade é maior que a noite (CCPS, 2000).

A estabilidade atmosférica é classificada de acordo com as seis classes de estabilidade de Pasquali denominadas de A até F, sendo A o mais instável e F o mais estável (CCPS, 2000).

Para análise de vulnerabilidade deste trabalho foram utilizadas as condições meteorológicas definidas pela CETESB (2011), conforme apresentado no Quadro 2.

Quadro 2: Dados das condições atmosféricas utilizadas na simulação

Parâmetros	Período diurno	Período noturno
Temperatura ambiente	25 °C	20 °C
Velocidade do vento	3 m/s	2 m/s
Categoria de estabilidade atmosférica	C	E
Umidade relativa do ar	80%	80%

Direção do vento	12,5 (distribuição uniforme em oito direções)	12,5 (distribuição uniforme em oito direções)
Temperatura do solo	30 °C	20 °C

Fonte: CETESB (2011)

3.4 Vulnerabilidade

O primeiro passo na análise de riscos é a identificação dos cenários de riscos. Estes cenários normalmente são identificados através de análises qualitativas, como What if, Hazop e análise preliminar de riscos (APR), onde o grau de risco é avaliado qualitativamente em relação a frequência e severidade do risco. (HYATT, 2004) (CCPS, 2000).

Os cenários são determinados pelos fatores de composição química (puro ou mistura), condições iniciais do processo (temperatura e pressão), tipo de liberação (pequeno furo, ruptura total), tipo de interação com os arredores (química ou mecânica), tipo de dispersão (dispersão no ar, na água ou solo), efeitos físicos (fluxo de calor, explosão, concentração atmosférica de material perigoso). (YELLOW BOOK, 2005).

Após a identificação dos riscos pela análise qualitativa, são selecionados os cenários que apresentam as consequências mais catastróficas para um estudo quantitativo. Onde a probabilidade ou a frequência dos fatores envolvidos são levados em conta, como por exemplo, frequência de falha dos equipamentos de processo, frequência de falha das salvaguardas, probabilidade da direção do vento e probabilidade das condições meteorológicas (HYATT, 2004).

O derrame de líquido volátil pode gerar incêndio próximo a fonte de liberação, por ignição imediata, como o incêndio em poça. Ou o líquido pode evaporar e por fatores atmosféricos ser dispersado para locais de concentração de pessoas, ignitando retardamente. (YELLOW BOOK, 2005).

Os possíveis eventos envolvidos no derrame de líquidos inflamáveis são estimados por modelos matemáticos de evaporação e dispersão, em função do tempo. Estes modelos são encontrados na literatura e variam de acordo as condições de liberação.

a) Evaporação

O tipo de superfície de derrame (concreto, água, areia, etc), e a existência de confinamentos, como muros de contenção de líquidos em áreas de tancagem, determinam o raio máximo da poça formada por um vazamento.

A área superficial da poça formada determinará a área de evaporação, que representa um dos fatores utilizado no modelo de evaporação. Outros fatores importantes na evaporação são o coeficiente de transferência de massa e a temperatura do líquido na poça, governado pelo balanço de calor na superfície do líquido. (YELLOW BOOK, 2005)

b) Dispersão

Os principais fatores para a estimativa da dispersão da nuvem de vapor são: a concentração do composto químico, a densidade do gás, a estabilidade atmosférica, os dados meteorológicos da região e a densidade de obstáculos ou rugosidade aerodinâmica do cenário. (YELLOW BOOK, 2005)

A densidade de obstáculo é estimada em oito classes, conforme o Quadro 3.

Quadro 3: Classificação de obstáculos por comprimento de rugosidade.

Classe	Descrição	Rugosidade (m)
1	Água aberta por pelo menos 5 km.	0,0002
2	Neve, sem vegetação	0,005
3	Gramma, poucos obstáculos	0,03
4	Vegetação baixa, obstáculos grandes ocasionalmente	0,10
5	Vegetação alta, obstáculos dispersos	0,25
6	Parques, obstáculos numerosos	0,5
7	Cobertura regular de obstáculos grandes (florestas).	1
8	Centros urbanos variação de níveis altos e baixos de construções.	3

Fonte: YELLOW BOOK (2005)

Através da modelagem matemática dos eventos resultantes de um vazamento a análise de vulnerabilidade pode estimar a extensão geográfica de exposição e de danos causados ao homem e as estruturas (YELLOW BOOK, 2005).

Essa estimativa é realizada através de funções matemáticas do tipo Probit, para efeitos físicos de radiação térmica e toxicidade, ou através de valores definidos no caso de sobrepessão. (CETESB, 2011).

3.4.1 Valores de referência e Probit

a) Sobrepressão

A simulação de sobrepressão avaliou os dados considerando duas faixas de sobrepressão. A primeira considerou a probabilidade de 75 % (0,75) de fatalidade quando a sobrepressão foi maior que 0,3 bar. E a segunda região de sobrepressão de 0,1 a 0,3 bar, com a probabilidade de fatalidade de 25% (0,25) (CETESB, 2011).

b) Radiação Térmica

Para os efeitos de radiação como: incêndio em poça, foi avaliado a probabilidade de fatalidade de 100% (1,0), quando a radiação térmica foi maior ou igual a 35 kW.m⁻².

Conforme Purple Book (2005), o limite para a ignição de prédios é de 35 kW.m⁻², desta forma considera-se que pessoas abrigadas também virão a óbito para radiações iguais ou acima deste valor.

A probabilidade de fatalidade abaixo de 35 kW.m⁻² foi estimada utilizando a Equação 1 (TSAO; PERRY, 1979 apud CETESB, 2011), até o contorno de 1% de fatalidade.

$$Pr = -36,38 + 2,56 \ln[t \cdot I^{(4/3)}] \quad (1)$$

Onde,

- Pr é o Probit correspondente a probabilidade de fatalidade;
- t é a duração da exposição em segundos;
- I é a intensidade da radiação térmica em W/m².

O tempo de exposição utilizado foi de 20 s conforme CETESB (2011). Segundo Purple Book (2005) 20 s é o tempo necessário para as pessoas fugirem para um local seguro.

As funções de Probit são utilizadas para calcular a probabilidade de morte devido a exposição de substâncias tóxicas ou de radiação de calor (PURPLE BOOK, 2005).

As funções relacionam a probabilidade de morte com determinados níveis dos efeitos físicos durante um intervalo de tempo estabelecido.

O Quadro 4 apresenta os valores de Probit tabelados em relação a porcentagem de morte.

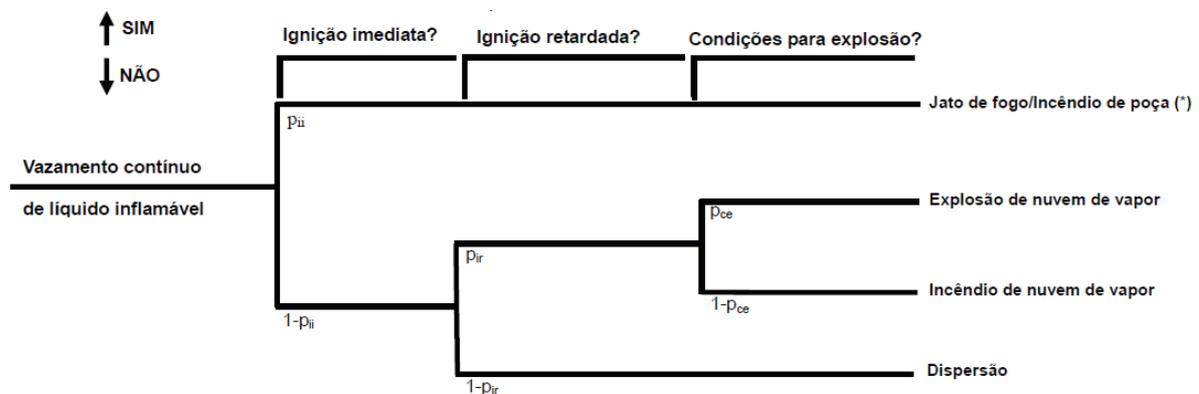
Quadro 4: Valores de Probit como função da probabilidade

P	0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0	-	2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
0.1	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
0.2	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
0.3	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
0.4	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
0.5	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
0.6	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
0.7	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
0.8	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
0.9	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33

Fonte: Purple Book (2005, p.5.2)

A probabilidade de ocorrência dos cenários acidentais foi estimada através da estrutura de árvore de falhas apresentada na Figura 4, conforme CETESB (2011, p.127).

Figura 4: Estrutura árvore de eventos



Fonte: CETESB (2011)

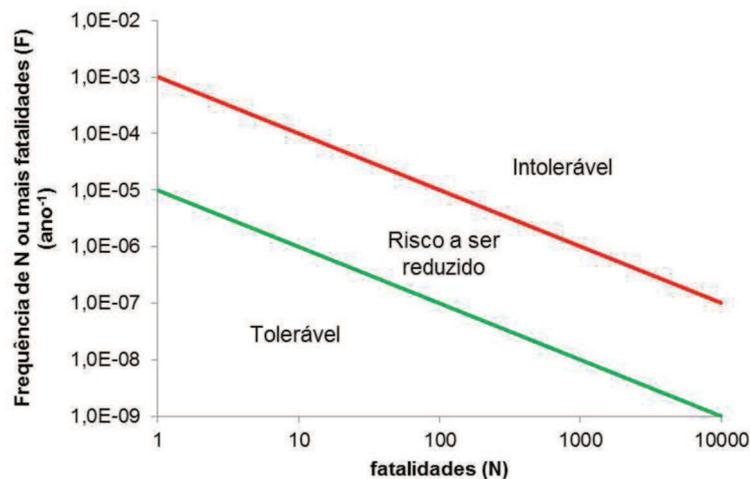
3.5 Risco Social

O risco social representa o risco de um determinado grupo de pessoas exposto aos efeitos físicos de um ou mais cenários acidentais (CETESB, 2011).

Para o cálculo do risco social o grupo de interesse considerado foi de 25 pessoas que representam os funcionários da empresa que trabalham no prédio administrativo, localizado a 80 m do tanque em uma área de 1360 m², sendo considerado que 80% das pessoas estão abrigadas.

A CETESB (2011) delimita através do gráfico de frequência de fatalidades (F) *versus* número de fatalidades (N), apresentado na Figura 5, três regiões de risco: tolerável, a ser reduzido e intolerável. Sendo avaliado a região em que se apresenta a curva do empreendimento.

Figura 5 Critério de tolerabilidade para risco social



Fonte: CETESB (2011)

Para curvas localizadas na região tolerável o empreendimento deve possuir um Plano de Gerenciamento do Risco residual. As curvas totais ou parciais na região de risco a ser reduzido requerem a implantação de medidas de segurança que reduzam o risco. Já as curvas situadas na região intolerável inviabilizam o projeto do empreendimento.

3.6 Risco Individual

O risco individual (RI) possui caráter geográfico e representa o risco para uma pessoa localizada em um determinado ponto vir a óbito, devido a um ou mais cenários acidentais, representado em unidade de tempo. São considerados todos os cenários de explosão, incêndio e dispersão de nuvem tóxica que extrapolem os limites do empreendimento, até o limite de 1% probabilidade de fatalidade ou até o limite inferior de inflamabilidade (LII) (CETESB, 2011).

A Tabela 1 apresenta os critérios de tolerabilidade para o risco individual (RI) estabelecidos pela CETESB.

Tabela 1: Critérios de tolerabilidade do risco individual.

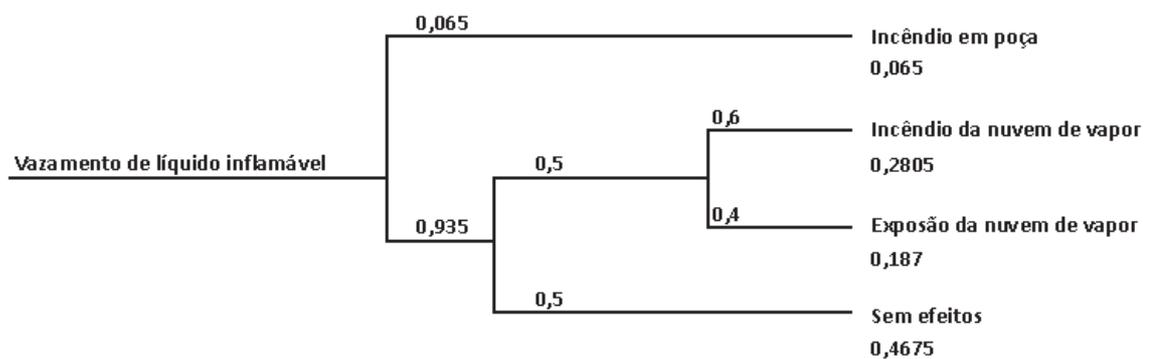
Risco	Valores de RI
Tolerável	$RI < 1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1}$
A ser reduzido	$1 \times 10^{-6} \text{ ano}^{-1} \leq RI \leq 1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$
Intolerável	$RI > 1 \times 10^{-5} \text{ ano}^{-1}$

Fonte: Elaborado pela autora, dados CETESB (2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os cenários gerados pelo vazamento de líquido inflamável (evento iniciador) estão apresentados na árvore de eventos da Figura 6.

Figura 6: Árvore de eventos aplicada a hipótese acidental



Fonte: Elaborado pela autora

Cada ramo da árvore representa um efeito físico e sua probabilidade de ocorrência. As probabilidades de ocorrência foram estimadas conforme CETESB (2011), onde a probabilidade de ignição imediata tabelada é de 0,065 para p_{ii} e 0,4 para p_{ce} . A probabilidade de ignição retardada p_{ir} foi estimada conservativamente como 0,9 (locais com muitas fontes de ignição).

Conforme DNV (1996 apud Purple Book, 2005), a possibilidade de ignição de uma nuvem de vapor não confinada pode ser dividida em dois eventos um incêndio em nuvem e uma explosão, sendo razoável a divisão de 60% e 40%.

A frequência do evento foi considerada como $5 \times 10^{-7} \text{ m}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, conforme Bevi (2009, p 43) para ruptura de tubulações com diâmetros superiores a 150 mm, não enterrados.

4.1 Dados de simulação

Os dados inseridos no software Riskan para a simulação dos efeitos físicos e análise de vulnerabilidade gerada pelos cenários estão apresentados no Quadro 5.

Quadro 5: Dados de entrada da simulação de vazamento no *software* Riskan.

Simulação	Parâmetro	Grande Vazamento	Médio Vazamento	Pequeno Vazamento
Descarga de líquido de tanque atmosférico <i>Manual Riskan, Modelo 6.1.1, Página 185. Modelo de descarga equipe Serenoware. Modelo baseado na equação de Bernoulli para fluidos.</i>	Temperatura inicial do tanque	20 °C	20 °C	20 °C
	Coeficiente de descarga	0,64	0,64	0,64
	Tempo de vazamento	1 h	1 h	1 h
	Diâmetro do vazamento	8 in	3 in	1/2 in
Evaporação de líquidos em terra <i>Manual Riskan, Modelo 6.2.2, Página 206. Modelo de espalhamento e evaporação de poça Equipe Serenoware. Modelo empírico baseado no arraste de vapor</i>	Formação da poça	Transiente	Transiente	Transiente
	Tempo de evaporação	1 h	1 h	1 h
	Tipo de superfície	Concreto	Concreto	Concreto
Dispersão de gás inflamável pesado constante a partir de poça <i>Manual Riskan, Modelo 6.4.7, Página 318. Dispersão de gás pesado pela equipe Serenoware. Modelo de dispersão de gás pesado do tipo caixa (SLAB).</i>	Área de liberação	1.450 m ²	1.450 m ²	80 m ²
	Tempo de amostragem	20 s	20 s	20 s
	Umidade relativa do ar	80%	80%	80%
	Rugosidade do terreno	0,1	0,1	0,1
Explosão em nuvem (VCE) multi-energia <i>Manual Riskan, Modelo 6.5.6, Página 500. Modelo de explosão multi-energia da Equipe Serenoware. Modelo semi-empírico baseado na literatura.</i>	Classe de densidade de obstáculos	6	6	6
	Menor sobre pressão de interesse	0,05 bar	0,05 bar	0,05 bar
	Pressão ambiente	1 bar	1 bar	1 bar
Incêndio em poça <i>Manual Riskan, Modelo 6.3.1, Página 218. Modelo de incêndio em poça da equipe Serenoware. Modelo semi-empírico baseado na literatura.</i>	Fluxo térmico mínimo	200 W/m ²	200 W/m ²	200 W/m ²
	Tempo máximo de exposição	20 s	20 s	20 s
	Umidade relativa do ar	80%	80%	80%
	Temperatura ambiente	20 °C	20 °C	20 °C

Fonte: Elaborado pela autora.

O diâmetro considerado como grande vazamento corresponde ao diâmetro da linha de descarga da bomba "A" (8 in), sendo considerado sua ruptura total. Para os diâmetros de médio e pequeno vazamento foram considerados furos de 3 in e 1/2 in, respectivamente. Sendo considerado um coeficiente de descarga de 0,64, coerente com o valor recomendado (0,62) pelo Purple Book (2005) para furos pequenos.

O tempo de descarga e de evaporação foram estimados em 1 h, sendo o tempo necessário para o operador identificar o vazamento e fechar manualmente as válvulas de bloqueio.

A classe de densidade de obstáculo foi considerada como classe 6, devido à alta vegetação que circunda o empreendimento, conforme Purple Book (2005, p.4.11).

Usualmente, a área da fonte é a área total da poça formada. Entretanto, para o grande e médio vazamento, foi utilizada conservativamente, uma área inferior (1/4 da área da poça) pois, para uma mesma taxa de liberação, a concentração do vapor formado é maior, resultando em uma nuvem de vapor também maior.

4.2 Resultados da simulação de explosão em nuvem

O resultado para a análise de vulnerabilidade da simulação de explosão em nuvem está apresentado na forma de curvas de pressão na Figura 7.

Figura 7: Curvas de sobrepressão para grande vazamento



Fonte: Elaborado pela autora, através de simulação no *software* Riskan.

Figura 8: Curvas de sobrepressão para médio vazamento



Fonte: Elaborado pela autora, através de simulação no *software* Riskan.

Conforme premissa da CETESB apresentada no item 3.4.1 a) foi gerado as curvas de sobrepressão de 0,3 bar equivalente a probabilidade de 75% de fatalidade para as três hipóteses de vazamento. Para o grande vazamento a distância vulnerabilidade referente a 75% de fatalidade cobriu um raio de 96,6 m da origem da explosão já para o médio vazamento cobriu um raio de 75,6 m.

A curva de 0,1 bar equivalente a probabilidade de 25% de fatalidade atingiu um raio de 203 m para o grande vazamento e de 160,6 m para o médio vazamento, atingindo parte da empresa vizinha localizada ao norte. O pequeno vazamento não atingiu os limites de explosividade, não gerando explosão.

Níveis de sobrepressão de 0,3 bar podem causar danos catastróficos as construções sendo provável a fatalidade de pessoas abrigadas. Outros efeitos de sobrepressão estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6: Efeitos observados para diferentes níveis de sobrepressão

Efeitos	Sobrepressão (Bar)
Quebra de vidros	0,01
Danos Estruturais menores	0,03
Destruição quase completa de casas	0,34 a 0,48
Provável destruição completa de estruturas civis e equipamentos pesados (5,4 ton)	0,69

Destruição de 99% do tanque metálico para combustíveis	1,38
--	------

Fonte: Clansey (1972 apud Mendonça e Jerônimo, 2014).

4.3 Resultados da simulação de incêndio em poça

A Tabela 2 apresenta os valores dos níveis de radiação térmica obtidos pelo cálculo da Equação 1 para os valores de Probit referentes a 1%, 50% e 99% de probabilidade de óbito.

Tabela 2: Valores resultantes da equação de Probit para radiação térmica

Probabilidade de fatalidade (%)	Tempo de exposição (s)	Probit	Radiação térmica (KW/m ²)
99	20	7,33	38,50
50	20	5,00	19,46
1	20	2,67	9,83

Fonte: Elaborado pela autora

Apesar do cálculo de Probit para 99% de fatalidade resultar em radiações acima de 38,5 kW/m², a análise de vulnerabilidade considerou a mesma probabilidade para radiações acima de 35 kW/m², conforme critério da CETESB (2011),

O resultado da análise de vulnerabilidade para a simulação de incêndio em poça está apresentado na Figura 9, representado pelas curvas de radiação térmica, equivalentes a 1%, 50% e 100% de probabilidade de fatalidades.

Figura 9: Curvas de Radiação Térmica



Fonte: Elaborado pela autora, através de simulação no *software* Riskan.

As curvas de radiação térmica demonstram a probabilidade de morte de 100% a uma distância de 16,7 m, de 50% a uma distância de 25,2 m e 1% a uma distância de 30,4 m a partir da origem do incêndio, para as três hipóteses de vazamento.

O Quadro 7 apresenta os efeitos causados para diferentes níveis de radiação térmica.

Quadro 7: Efeitos da radiação térmica para diferentes níveis

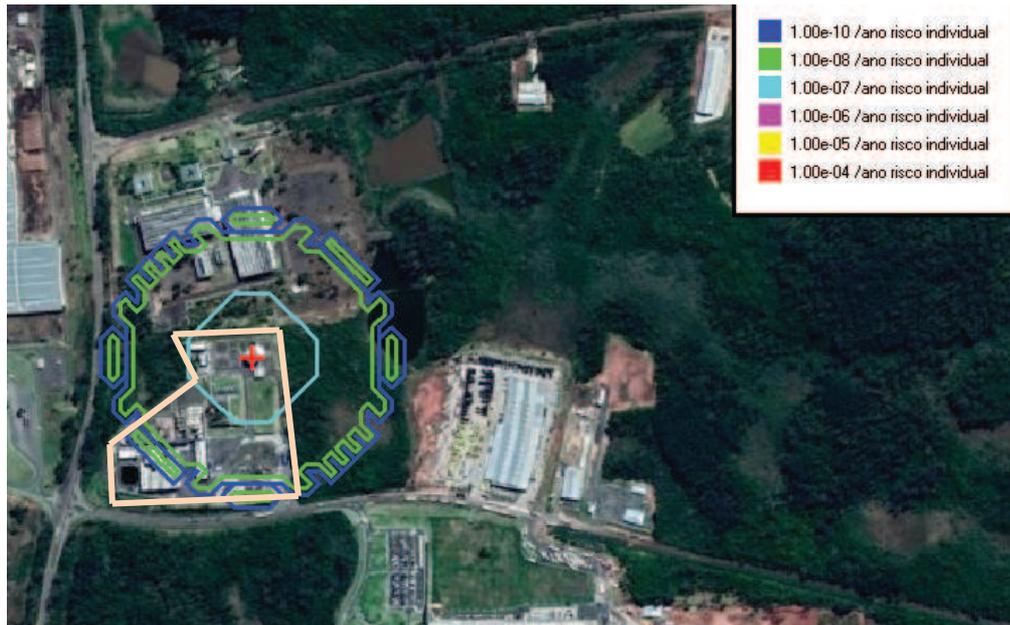
Radiação térmica (kW/m ²)	Características
1 a 1,6	Radiação suportável sem o uso de roupas protetoras
4 a 5	Radiação suportável com o uso de roupas protetoras
12	Limite para ignição de vegetação
12,5	Radiação que provoca queimaduras letais. Energia mínima para ignição de madeira.
25,0	Energia mínima para a ignição espontânea da madeira.
37,5	Radiação que provoca queimaduras letais. Perigo a vida. Danos a equipamentos.

Fonte: Purple Book (2005 apud Mendonça e Jerônimo, 2014)

4.4 Análise do Risco Individual e Social

O risco individual está representado pelas curvas de isorriscos ilustradas na Figura 10

Figura 10: Risco Individual representado por contornos de isorriscos para o grande vazamento.



Fonte: Elaborado pela autora, através de simulação no *software* Riskan.

Figura 11: Risco Individual representado por contornos de isorriscos para o médio vazamento.



Fonte: Elaborado pela autora, através de simulação no *software* Riskan.

Conforme observado a curva referente ao isorrisco de frequência 1.00×10^{-7} ano⁻¹ ultrapassa levemente os limites da empresa, porém faixas de risco social acima de 1.00×10^{-7} não foram identificadas no estudo, mantendo-se dentro da faixa de risco tolerável conforme critérios de tolerabilidade estabelecidos pela CETESB (2011).

A simulação apresentou risco individual médio de 4.01×10^{-10} ano⁻¹ para grande vazamento e de 5.46×10^{-11} ano⁻¹ para médio vazamento. O pequeno vazamento não apresentou risco individual.

A simulação não apresentou risco social para nenhum dos efeitos simulados.

5 CONCLUSÃO

O Estudo de Análise de Riscos (EAR) exigido pelos órgãos ambientais brasileiros e internacionais é uma ferramenta importante de gestão dos riscos gerados pelas instalações industriais, principalmente aquelas situadas próximo a regiões urbanas, onde a concentração da população é maior.

A localização da empresa deste estudo é estrategicamente afastada de zonas urbanas e cercada por um cinturão de vegetação de propriedade da própria empresa, e de empresas vizinhas, o que evita a instalação de residências próximas as indústrias.

A análise de vulnerabilidade para o efeito de sobrepressão apresentou isorriscos de alcance próximos, tanto para a hipótese do grande quanto do médio vazamento. Ambos atingiram o prédio administrativo com uma faixa de sobrepressão entre 0,3 e 0,1 bar, podendo causar danos a estrutura do prédio.

O pequeno vazamento apresentou formação de poça de 5 m de raio e não atingiu os limites de inflamabilidade capazes de gerar explosão.

A análise de risco individual apresentou resultados dentro da faixa de tolerabilidade ($RI < 1.00 \times 10^{-6}$ ano⁻¹) estabelecido pela CETESB (2011), tanto para o grande como para o médio vazamento na linha de sucção da bomba do tanque de n-Hexano.

Devido as diferentes condições atmosféricas o vazamento de líquido inflamável ocorrido durante o dia não gerou nuvem inflamável para nenhuma das três hipóteses de vazamento. O efeito de explosão foi gerado apenas para a noite, onde as condições atmosféricas são mais estáveis.

Os níveis de radiação térmica gerados pelo incêndio em poça analisado para a probabilidade de fatalidade conforme CETESB (2011) permaneceram próximos a área limitada pela bacia de contenção, atingindo a distância de 30,4 m a partir da origem do incêndio para 9,83 kW/m².

A avaliação dos níveis térmicos pode ser utilizada também para a elaboração do plano de atendimento a emergência da empresa. Considerando que o nível térmico suportável para pessoas utilizando roupas de proteção é de 5 kW/m², conforme apresentado no Quadro 7. Os brigadistas estariam expostos a esse nível de radiação a distâncias inferiores a 46 m da origem do incêndio. Através dessa informação os planos de combate podem ser elaborados visando a segurança dos brigadistas.

Como a estimativa do risco individual se apresentou dentro dos limites toleráveis e como o número de pessoas dentro da distância de referência estabelecida pela CETESB (2011) de 124 m, para locais de armazenamento de n-Hexano com capacidade até 7500 m³, não ultrapassa 25 pessoas, a empresa estaria dispensada de apresentar um estudo de análise de risco (EAR), porém deverá apresentar um programa de gerenciamento de risco (PGR) de forma a gerenciar o risco residual existente.

Poderia ser avaliado a redução do risco reduzindo-se o tempo de vazamento com a implementação de um sistema de intertravamento remoto, cuja probabilidade de falha por demanda para sistemas com nível de integridade de segurança (SIL 1) é considerado entre a faixa de 1×10^{-2} e 1×10^{-1} , reduzindo o risco na ordem 10 a 100 vezes, conforme CCPS (2001).

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 20 - Segurança e Saúde no Trabalho com Inflamáveis e Combustíveis**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2017. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR20.pdf> >. Acesso em: 06 out. 2018.

BRASIL. Ministério Público Federal - denúncia – Autos nº 0000226-11.2017.403.6104 IPL nº 0207/2015 – DPF/STS/SP, 2015. Disponível em: < http://www.mpf.mp.br/sp/sala-de-imprensa/docs/santos_denuncia_ultracargo.pdf/ >. Acesso em: 06 out. 2018.

CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, New York, 2° Edition, 2000.

CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Guidelines for Evaluating Process Plant Buildings External Explosions and Fire**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, New York, 1996.

CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Guidelines for Fire Protection in Chemical, Petrochemical, and Hydrocarbon Processing Facilities**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, New York, 2003.

CCPS - Center for Chemical Process Safety, **Layer of Protection Analysis Simplified process risk assessment**, American Institute of Chemical Engineers AIChE, New York, 2001.

CETESB - COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL.

FEPAM – Fundação Estadual de Proteção Ambiental Henrique Luiz Roessler-RS. Manual de Análise de Riscos Industriais. Rio Grande do Sul, fev. 2016. 50 p. (Manual de Análise FEPAM 01/01). Disponível em: < http://www.fepam.rs.gov.br/central/formularios/arg/manual_risco.pdf >. Acesso em: 01 ago. 2018.

GT- CREA/SP. **Estudo de Implementação das Recomendações da “Carta de Santos - 2015”, Relatório Final** – Segurança em Terminais Portuários, Retroportuários e instalações que Manipulem Produtos Perigosos. CREA – 2015. Disponível em: < <http://www.abtl.org.br/wp-content/themes/abtl/arquivos/GT%20-%20INC%C3%80NDIO%20ALEMOA%20-%20RELAT%C3%93RIO%20FINAL%20-%20Vers%C3%A3o%20final%2019.07.16.pdf> >. Acesso em: 06 out.2018.

HSE - Health and Safety Executive. **Control of Major Accidents Hazards Regulations**, Inglaterra, Third edition, jun. 2015.

HSE. **Storage of flammable liquids in tanks**. 2015.

HYATT, Nigel, **Guidelines for Process Hazards Analysis, Hazards Identification & Risk Analysis**, 1° Edition, 8th Printing, p 22.13, march 2004.

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Relatório de Acidentes Ambientais 2014**, Ministério do Meio Ambiente, 2015.

Disponível em: <

https://www.ibama.gov.br/phocadownload/relatorios/acidentes_ambientais/ibama-2014-relatorio_acidentes_ambientais.pdf >. Acesso em: 02 out. 2018.

LEES, F. P. **Loss prevention in the process industries: hazard identification, assessment and control**. Oxford: 2.ed., Butterworth-Heinemann, 1996. 3 v. 3500 p.

Mendonça L. V.; Jerônimo C. **Análise quantitativa de risco: Paio de explosivos utilizados no processo de canhoneio de um poço de petróleo**. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGET e-ISSN 2236 1170 - V. 18 n. 1 Abr 2014, p.361-372

NATIONAL INSTITUTE OF PUBLIC HEALTH AND THE ENVIROMENT (RIVM). **Reference Manual BEVI Risk Assessments**. Version 3.2. Netherlands, 2009.

NESS, Albert - **Lessons Learned from Recent Process Safety Incidents** — Center for Chemical Process Safety – CCPS – 2015.

NIOSH - NATIONAL INSTITUTE FOR OCCUPATIONAL SAFETY AND HEALTH. **International chemical safety cards (ICSCs): NIOSH Pocket Guide to Chemical Hazards**, out. 2018. Disponível em:

<<https://www.cdc.gov/niosh/npg/npgd0322.html>>. Acesso em: 30 out. 2018.

Norma Técnica P4.261 - Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para decisão e termos de referência. 2º Edição, São Paulo, Dezembro/ 2011.

Disponível em: < <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2013/11/P4261-revisada.pdf> >. Acesso em: 06 out. 2018.

REIS, Hélio Gervásio dos. **“Exigências de análise de risco de acidentes, para fins de licenciamento, em instalações que Manipulam substâncias perigosas, e proposição de abordagem para atendimento”**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, Campinas, São Paulo, 2007. Disponível em: <

<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266166> >. Acesso em: 06 out. 2018.

TNO – The Netherland Organization of Applied Scientific Research. **Guidelines for quantitative risk assessment. Em: Series on Dangerous Substances (Purple Book)**. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, v. 3, 2005.

TNO – The Netherland Organization of Applied Scientific Research. **Methods for calculation of physical effects – due to release of hazardous material (liquid and gases) – (Yellow Book)**. Amsterdam: Ministerie van Verkeer en Waterstaat, v. 3, 2005.

UNITED KINGDON, **Health and Safety Executive. Injury reported data by agent, time period and severity**. Disponível em:

< <https://handson.hse.gov.uk/hse/public/home.aspx> >. Acesso em 26 mai. 2012.

USEPA - U.S. Environmental Protection Agency Federal. **Technical Guidance for Hazards Analysis Emergency Planning for Extremely Hazardous Substances**, Emergency Management Agency U.S. Department of Transportation, dez. 1987