

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

**ANÁLISE DE RISCO NO TRANSPORTE RODOVIÁRIO DE COMBUSTÍVEIS
LÍQUIDOS NO BRASIL**

Valentina de Oliveira Guarino

Trabalho de Graduação apresentado ao
Departamento de Engenharia Química da
Universidade Federal de São Carlos

Orientador: Profa. Vádila Giovana Guerra Béttega

São Carlos – SP

2022

BANCA EXAMINADORA

Trabalho de Graduação apresentado no dia 12 de abril de 2022 perante a seguinte banca examinadora:

Orientadora: Vádila Giovana Guerra Béttega, DEQ/UFSCar

Convidada: Alice Medeiros de Lima, DEQ/UFSCar

Professor da Disciplina: Marcelo Percin de Arruda Ribeiro, DEQ/UFSCar

AGRADECIMENTOS

Agradeço e dedico este trabalho aos meus pais, Marcelo e Adriana, que nunca mediram esforços para tornar esse sonho possível; a minha irmã Victória, por ser sempre um exemplo para mim; ao meu namorado André, por todo o apoio; e aos amigos que fiz ao longo da faculdade e levarei para a vida, por todo o companheirismo e motivação nessa jornada.

RESUMO

O transporte de combustíveis líquidos é feito de forma majoritária através do modal rodoviário por todo o território brasileiro. Os volumes transportados aumentam anualmente e, proporcionalmente a isto, cresce também a responsabilidade dos atores deste processo logístico, visto que os combustíveis são produtos perigosos e que oferecem grande risco ao meio ambiente e a sociedade se manuseados de forma incorreta. A legislação do transporte rodoviário de produtos perigosos no Brasil é extremamente rigorosa e, esta, se interconecta com as legislações ambientais, já que os danos potenciais associados a essa atividade são muito grandes. Por isso, é de extrema importância a análise prévia dos riscos que fazem parte desse processo, para tornar possível a atuação de forma preventiva a fim de evitar acidentes ambientais com alto risco potencial associado. Este trabalho irá tratar da utilização de algumas metodologias e ferramentas que auxiliam na identificação e posterior análise de riscos. No caso, a Análise HAZOP, a Matriz de Risco, a Análise LOPA e o software ALOHA serão detalhados, aplicados em um caso real e a partir dos resultados obtidos serão analisadas a efetividade e melhor aplicabilidade para cada uma das metodologias e ferramentas utilizadas. O uso dessas metodologias permite a identificação e priorização dos principais gargalos no processo a fim do desenvolvimento de soluções e/ou melhorias no intuito de tornar o transporte de combustíveis cada vez mais seguro para todos os agentes envolvidos.

Palavras-chave: *transporte de combustíveis; identificação e análise de riscos; HAZOP; LOPA; ALOHA.*

ABSTRACT

Distribution of liquid fuels is mainly done by roadways across Brazilian territory. Transported volumes increase every year, and the responsibility of those involved in this logistic process grows proportionally, since fuels are hazardous products that offer great risk to the environment and society if handled incorrectly. Brazil's legislation towards road transport of hazardous products is extremely rigorous and interconnected to environmental legislation, since potential damage related to this activity is immense. With that said, previous risk analysis is extremely important in order to act preventiously to avoid potential environmental accidents with high possible risk. This work will deal with the use of some methodologies and tools that help in the identification and subsequent analysis of risks. In this case, the HAZOP Analysis, the Risk Matrix, the LOPA Analysis and the ALOHA software will be detailed, applied in a real case and from the results obtained, the effectiveness and better applicability for each of the methodologies and tools used will be analyzed. The use of those methodologies allows for identification and prioritization of the main bottlenecks in the development of solutions and improvements towards making roadways liquid fuels distribution safer for all those involved.

Keywords: *transport of fuels; risk identification and analysis; HAZOP; LOPA; ALOHA.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Fluxo logístico de distribuição de combustíveis.....	5
Figura 2 -	Consumo de combustível por região do Brasil em 2020.....	6
Figura 3 -	Rótulo de Risco da Gasolina A.....	10
Figura 4 -	Painel de segurança do Etanol.....	11
Figura 5 -	Cadeia logística de abastecimento de combustíveis no Brasil.....	16
Figura 6 -	Cadeia logística de abastecimento de combustíveis simplificada.....	17
Figura 7 -	Ocorrências de acidentes com produtos perigosos registradas pela CETESB nos últimos 11 anos.....	18
Figura 8 -	Processo de Identificação de Perigos e Avaliação de Risco.....	19
Figura 9 -	<i>Checklist</i> típico de segurança de processos.....	22
Figura 10 -	Exemplo de Árvore de Falhas.....	24
Figura 11 -	Exemplo de Árvore de Eventos para vazamento de líquido inflamável	27
Figura 12 -	Exemplo de estudo HAZOP aplicado a um reator exotérmico.....	32
Figura 13 -	Exemplo de Matriz de Risco.....	33
Figura 14 -	Camadas de Proteção em um cenário específico de acidente.....	34
Figura 15 -	Comparação entre Árvores de Eventos e LOPA.....	34
Figura 16 -	Interface genérica do Software ALOHA.....	37
Figura 17 -	Incêndio causado pelo tombamento de um caminhão-tanque carregado de gasolina A.....	38
Figura 18 -	Cenário após controle de incêndio causado pelo tombamento de um caminhão-tanque pelo corpo de bombeiros.....	39
Figura 19 -	Fluxograma do processo simplificado de transporte de combustíveis líquidos.....	39
Figura 20 -	Matriz de Risco.....	42
Figura 21 -	Zona de ameaça.....	50
Figura 22 -	Aplicação das Zonas de Ameaça no Google Earth.....	51
Figura 23 -	Recorrência de parâmetros na análise HAZOP.....	51
Figura 24 -	Distribuição dos desvios identificados de acordo com nível de risco e "nó".....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Classificação dos produtos perigosos quanto ao risco apresentado....	8
Tabela 2 -	Grupos de Equipamentos de Segurança segundo a ABNT NBR 9735.....	12
Tabela 3 -	Incompatibilidade química para o transporte por meio terrestre de produtos perigosos de Classe 3.....	13
Tabela 4 -	Identificação de perigos em uma confraternização de empresa pela técnica <i>What-If</i>	23
Tabela 5 -	Componentes utilizados na construção de uma AAF.....	26
Tabela 6 -	Exemplos de possíveis parâmetros da operação.....	30
Tabela 7 -	Palavras-guia e seus respectivos significados.....	30
Tabela 8 -	Exemplos de desvios resultantes da combinação de parâmetros com palavras-guia.....	30
Tabela 9 -	Classificação quanto ao nível de frequência.....	41
Tabela 10 -	Classificação quanto ao nível de severidade.....	41
Tabela 11 -	Estudo HAZOP para "nó" 1.....	43
Tabela 12 -	Estudo HAZOP para "nó" 2.....	44
Tabela 13 -	Estudo HAZOP para "nó" 3.....	46
Tabela 14 -	Ficha de registro do estudo LOPA.....	48

NOMENCLATURA

AAE	Análise por Árvore de Eventos
AAF	Análise por Árvore de Falhas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALOHA	<i>Areal Locations of Hazard Atmospheres</i>
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTT	Agência Nacional de Transportes Terrestres
BLEVE	<i>Boiling Liquid Vapor Explosion</i>
CBIE	Companhia Brasileira de Infraestrutura
CCPS	<i>Center for Chemical Process Safety</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CONTRAN	Conselho Nacional de Trânsito
CTF	Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos EUA
HAZOP	<i>Hazard and Operability Study</i>
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais e Renováveis
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia
IPAR	Identificação de Perigos e Análise de Riscos
IPL	Camada de Proteção Independente
LOPA	<i>Layer of Protection Analysis</i>
MOPP	Movimentação Operacional de Produtos Perigosos
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
PFD	Probabilidade de falha sob demanda
SIF	<i>Safety Instrumented Function</i>
TRR	Transportadora Revendedora Retalhista
WI	<i>What-If</i>

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE TABELAS.....	vi
NOMENCLATURA.....	vii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Cenário do consumo de combustíveis no Brasil.....	3
2.2. Produtos perigosos para transporte	7
2.3. Normas e Legislações associadas ao transporte de combustíveis.....	9
2.3.1. Normas Técnicas	9
2.3.1.1. ABNT NBR 7500 - Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos	9
2.3.1.1.1. Rótulo de Risco	10
2.3.1.1.2. Painel de Segurança.....	10
2.3.1.2. ABNT NBR 9735 – Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos	12
2.3.1.3. ABNT NBR 14619 – Transporte terrestre de produtos perigosos – Incompatibilidade química	13
2.3.2. Legislação Ambiental	14
2.3.3. Regulamentação de Caminhão Tanque	14
2.4. A cadeia logística de distribuição de combustíveis	15
2.5. Acidentes no transporte rodoviário de combustíveis	17
2.6. Identificação de Perigos e Análise de Riscos	18
2.6.1. Identificação de Perigo	20
2.6.1.1. <i>Checklist</i>	21
2.6.1.2. <i>What-If</i> (WI).....	22
2.6.1.3. HAZOP.....	23
2.6.2. Avaliação de Riscos.....	23
2.6.2.1. Árvore de Falhas (AAF).....	24
2.6.2.2. Árvore de Eventos (AAE).....	27
2.6.2.3. LOPA	28

3. METODOLOGIAS	29
3.1. HAZOP	29
3.2. Matriz de Risco	32
3.3. Análise de Camada de Proteção (LOPA)	33
3.4. Modelagem de cenário através do Software ALOHA	36
4. ESTUDO DE CASO	38
4.1. Descrição do cenário.....	38
4.2. Identificação de Perigos.....	39
4.2.1. Adaptação do estudo HAZOP ao caso	40
4.2.2. Aplicação do HAZOP.....	40
4.2.2.1. Aplicação da Matriz de Risco	41
4.3. Análise de Riscos.....	47
4.3.1. Aplicação da LOPA.....	47
4.3.2. Aplicação do Software ALOHA para modelagem de cenário	49
4.4. Discussão dos Resultados	51
5. CONCLUSÃO	54
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
7. ANEXOS.....	60

1. INTRODUÇÃO

O Brasil, ao longo dos anos, recebeu um investimento muito maior na estruturação do seu modal rodoviário do que em outros modais como ferrovias e dutos. Isso ocorreu devido a diversos fatores históricos e que resultaram em uma malha de transportes muito dependente das rodovias, com fluxos muito reduzidos e de baixo alcance nos outros modelos de transportes. Dessa forma, assim como a distribuição de qualquer produto no território brasileiro, a distribuição de combustíveis ocorre majoritariamente pelo modal rodoviário.

Os combustíveis são produtos químicos inflamáveis que exigem um cuidado especial durante o seu transporte. Exatamente por isso, existem legislações e normas que regem como deve acontecer essa atividade e que são rigorosamente fiscalizadas. Essa precaução é necessária, pois qualquer acidente, derrame, vazamentos, etc. podem trazer consequências severas para a sociedade e meio ambiente, desde a contaminação de solo e águas até consequências fatais a partir de incêndios e explosões, por exemplo.

Segundo dados da ANP (Agência Nacional do Petróleo), o consumo de combustíveis vem crescendo ano após ano no país. Vários fatores influenciam isso, mas um deles está justamente na concentração do transporte brasileiro no modal rodoviário, visto que os caminhões utilizados nesse transporte são movidos a diesel, um dos combustíveis objeto de estudo deste trabalho. Assim, conforme o consumo brasileiro aumente em qualquer produto ou setor, isso influenciará diretamente no consumo de combustível.

Conforme a demanda aumenta, mais caminhões transportando produtos inflamáveis estarão nas rodovias expostos a riscos. A exposição no transporte rodoviário é muito grande, pois o caminhão é inserido em um ambiente que é influenciado por fatores externos não controláveis e então, muitas precauções devem ser tomadas. Para que medidas preventivas possam ser tomadas, é fundamental que os riscos sejam mapeados e conhecidos.

A etapa de identificação de riscos é fundamental no processo de determinação de procedimentos de segurança e para realizá-la existem inúmeras metodologias que auxiliam nesse processo. Uma das metodologias muito empregadas é a análise HAZOP (*Hazard and Operability Study*) que será detalhada e aplicada mais adiante neste trabalho. A partir dessa metodologia, obtém-se um relatório completo de todos os possíveis desvios

identificados em uma instalação, processo ou atividade e suas causas e consequências. Essa metodologia é muito utilizada, pois funciona como complemento de outras metodologias de análise de risco.

Na análise de risco já temos os riscos mapeados e o objetivo principal é priorizar e determinar quais riscos necessitam de atuação imediata e também, qualificar os riscos identificados de acordo com as regras do processo em que está inserido e tolerâncias ao risco envolvidas. Essa etapa pode ter um viés mais quantitativo ou qualitativo e em ambos os casos tem o intuito de direcionar o desenvolvimento dos procedimentos de segurança necessários.

Para essa etapa do processo, a Matriz de Risco é um exemplo de ferramenta que pode ser utilizada junto a alguma metodologia de identificação de riscos e a Análise de Camadas de Proteção é um exemplo de metodologia de fato utilizada para a avaliação de riscos. Ambas serão detalhadas e aplicadas posteriormente.

O ideal é que a identificação e análise de risco sejam feitas antes do início de qualquer processo afim de antecipar os riscos e ser eficiente na prevenção de acidentes. Pensando nisso, este trabalho analisará um caso real de acidente no transporte rodoviário de combustíveis, no qual um caminhão-tanque carregado com 60 mil litros de gasolina tombou em uma rodovia ocasionando uma explosão seguida de incêndio. O objetivo do estudo de caso é prever os riscos envolvidos no processo e entender como a identificação e análise de risco poderia ter atuado a fim de evitar que esse evento ocorresse.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados temas referentes ao cenário de consumo e distribuição de combustíveis no Brasil assim como as normas e legislações que regulamentam essa atividade no país.

2.1. Cenário do consumo de combustíveis no Brasil

Por ser um país de dimensões continentais, o Brasil exige uma cadeia de abastecimento enorme e extremamente complexa para qualquer produto, mas principalmente para produtos químicos perigosos, como é o caso dos combustíveis devido aos riscos associados a essa atividade. A distribuição de combustíveis utiliza toda a infraestrutura física que o país oferece: terminais de armazenagem, oleodutos, hidrovias, ferrovias e sobretudo, as rodovias (CBIE, 2020).

O modelo rodoviário de transporte foi o que mais recebeu investimento ao longo dos anos no Brasil e como consequência disso, é o modelo mais utilizado atualmente, não apenas pela logística de combustíveis. Isso acontece, pois a rede logística brasileira apesar de bastante desenvolvida, ainda é muito deficitária, a rede ferroviária e dutoviária são muito reduzidas, levando o país a uma dependência do modal rodoviário que hoje é o mais abrangente no país e permite que locais muito afastados e até mesmo inóspitos sejam acessados e abastecidos (ALMEIDA, 2020).

A concentração da logística brasileira no modal rodoviário traz algumas problemáticas: principalmente nas regiões mais pobres do país, a infraestrutura rodoviária apesar de ser o único meio de acesso é precária, tornando o transporte lento e muito perigoso. Além disso, o extenso uso desse modal em todos os setores de distribuição e serviços do país, principalmente por caminhões movidos à diesel, traz um aumento significativo no consumo de combustíveis derivados do petróleo. Dessa forma, os riscos associados a distribuição de combustíveis são potencializados com o aumento da demanda interna do país (JÚNIOR, 2008).

A logística de combustíveis brasileira movimenta, em suma, biocombustíveis e combustíveis fósseis. Considerando apenas os combustíveis com maior demanda no país e de uso geral da população, temos o diesel e a gasolina como derivados do petróleo e o biodiesel, etanol anidro e hidratado como biocombustíveis. Os originados do petróleo são maioria na matriz de transportes, com uma representatividade de 69% enquanto os

biocombustíveis representaram 31% das movimentações no ano de 2020 segundo o Anuário Estatístico Brasileiro de 2021 da ANP (Agência Nacional do Petróleo).

Essa grande diferença entre as movimentações dos combustíveis fósseis e dos biocombustíveis se dá devido ao perfil de consumo dos brasileiros que pode ser explicada basicamente por dois fatores. O primeiro deles é a concentração da logística brasileira, de todos os produtos e serviços comercializados internamente, no modal rodoviário. Isso faz com que os níveis de consumo de diesel, combustível utilizado pelos caminhões que são os principais atores da distribuição rodoviária, sejam muito altos. Dentre os 69% citados anteriormente, 45,5% são referentes ao consumo de diesel e 23,5% de gasolina.

O segundo fator é o fato de dois dos três biocombustíveis analisados serem comercializados apenas como porcentagem obrigatória na venda de combustíveis derivados do petróleo visando uma menor emissão de poluentes por automotores. No caso, segundo a Lei 10.203/01, toda gasolina comercializada em território brasileiro precisa conter 27% de etanol anidro em sua composição e pela Lei 11.097/05, o diesel deve conter 10% de biodiesel em sua composição. As porcentagens obrigatórias variaram consideravelmente ao longo dos anos desde a criação das leis, principalmente por fatores econômicos relacionados ao preço dos biocombustíveis que refletem diretamente no preço do combustível vendido ao consumidor.

Assim, o único biocombustível que concorre de fato com o consumo de derivados do petróleo é o etanol hidratado, que concorre diretamente com a gasolina no abastecimento de carros de passeio principalmente. Porém, o fato do desempenho dos veículos em termos de distância percorrida por consumo de combustível (km/L) ser superior com a gasolina do que com o etanol, faz com que muitos consumidores prefiram a gasolina em detrimento do biocombustível pensando em ter que abastecer menos vezes ao longo da semana, por exemplo. Além disso, com base na diferença do consumo médio, em km/L, de um carro de passeio quando abastecido com os diferentes combustíveis, o abastecimento de etanol só compensa quando o preço dele for até 70% o valor da gasolina, o que nem sempre acontece visto que os preços de combustíveis dependem de muitos fatores externos que não são controláveis, como condições climáticas e situação econômica mundial.

Além do perfil de consumo do brasileiro, outro fator muito importante para a logística de distribuição são os pontos de produção ou fornecimento dos produtos. Na

Figura 1 podemos observar onde se concentram as produções de biodiesel e de derivados do petróleo e os principais fluxos de distribuição de acordo com o consumo.

Figura 1 – Fluxo logístico de distribuição de combustíveis



Fonte: Adaptado de ANP (2021).

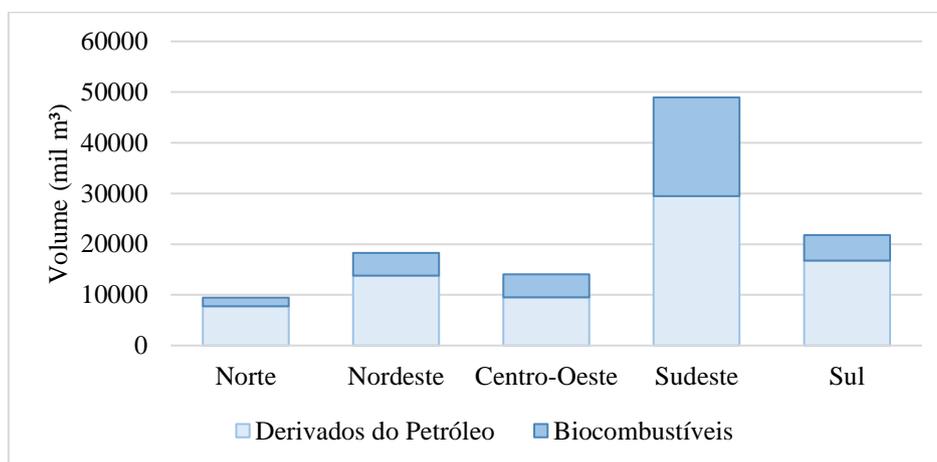
Com base em dados da ANP, a produção dos biocombustíveis se concentra no interior do país e a produção nacional é suficiente para suprir a demanda interna do país. Com relação aos derivados do petróleo, o Brasil não é autossuficiente no refino desses produtos, portanto, parte do que consumimos é importada. Assim, a produção e o recebimento da importação de derivados do petróleo se concentra no litoral do país, em maior concentração na região sul e sudeste, porém com pontos expressivos também no nordeste. O norte do país possui uma única refinaria em Manaus que é responsável por suprir toda a demanda da região (ANP, 2021).

Os terminais de distribuição são fundamentais para um bom funcionamento da logística de combustíveis no país. Eles são pontos de armazenagem e também de mistura dos biocombustíveis com os derivados de petróleo para que então, o produto final possa seguir para o consumidor final. Além disso, os terminais possuem localizações

estratégicas, próximos à demanda, afim de otimizar a logística de distribuição dos produtos (CBIE, 2020).

A linha tracejada na Figura 1 mostra as regiões de maior demanda de combustível do Brasil que coincidem com as regiões mais populosas do país. Cada uma das regiões possui atividades específicas, mas é nítido como o fator populacional influencia diretamente na demanda de combustível da região. Vale destacar que a região sudeste do Brasil é quase completamente coberta pela linha tracejada no mapa, o que faz da região a maior consumidora do país. Esse fato é comprovado pela Figura 2, em que podemos ver o consumo total em volume de combustíveis por região do país no ano de 2020.

Figura 2 – Consumo de combustível por região do Brasil em 2020



Fonte: Adaptado de ANP (2021).

Pela análise da Figura 2, pode-se afirmar que o consumo da região sudeste é maior que o dobro de qualquer uma das outras regiões do país. A região é a mais desenvolvida e com a maior população do país, então concentra tanto grandes centros produtores quanto consumidores e por isso, a demanda de combustíveis, com destaque para os derivados do petróleo, é muito grande. A região também é a mais rica do país e por isso, a estrutura de distribuição, tanto rodoviária quanto de outros modais, é muito superior às estruturas das outras regiões do país. A estrutura do modal será fator relevante no estudo dos riscos associados ao transporte rodoviário de combustíveis que veremos mais adiante.

2.2. Produtos perigosos para transporte

A ONU (Organização das Nações Unidas) possui um conjunto de recomendações desenvolvidas por um comitê de peritos em transporte de produtos perigosos da organização, também conhecido como *Orange Book*, que trata dos Regulamentos do Modelo de transporte de mercadorias perigosas. De acordo com essas recomendações, uma carga perigosa é aquela que pela sua natureza, pode provocar acidentes, danificando outras cargas ou os meios de transporte e colocando em risco as pessoas que a manipulam. Além disso, classificam como perigoso todo produto ou carga não identificado ou com informações insuficientes.

No Brasil, o órgão regulamentador do transporte terrestre é a ANTT (Agência Nacional de Transporte Terrestre). Ela se baseia nas recomendações da ONU e determina em sua Resolução Nº 5.947/21 que são considerados produtos perigosos para o transportes terrestre quaisquer produtos que tenham potencial de causar danos ou apresentar risco à saúde, segurança e meio ambiente.

A ANTT utiliza a classificação dos produtos perigosos estabelecida pelas recomendações da ONU que os divide em classes de 1 a 9. Os produtos devem ser alocados em uma única classe de acordo com o risco ou o mais sério dos riscos por ele apresentados. Segue abaixo na Tabela 1 a classificação dos produtos perigosos de acordo com a agência.

Os combustíveis, objeto de estudo deste trabalho, são produtos da classe 3 com exceção do biodiesel que se enquadra na classe 9.

Tabela 1 – Classificação dos produtos perigosos quanto ao risco apresentado

Classe	Subclasses
Classe 1 Explosivos	<p>Subclasse 1.1: Substâncias e artigos com risco de explosão em massa;</p> <p>Subclasse 1.2: Substâncias e artigos com risco de projeção, mas sem risco de explosão em massa;</p> <p>Subclasse 1.3: Substâncias e artigos com risco de fogo e com pequeno risco de explosão ou de projeção, ou ambos, mas sem risco de explosão em massa;</p> <p>Subclasse 1.4: Substâncias e artigos que não apresentam risco significativo;</p> <p>Subclasse 1.5: Substâncias muito insensíveis, com risco de explosão em massa;</p> <p>Subclasse 1.6: Artigos extremamente insensíveis, sem risco de explosão em massa.</p>
Classe 2 Gases	<p>Subclasse 2.1: Gases inflamáveis;</p> <p>Subclasse 2.2: Gases não-inflamáveis, não-tóxicos;</p> <p>Subclasse 2.3: Gases tóxicos.</p>
Classe 3 Líquidos inflamáveis	
Classe 4	<p>Sólidos inflamáveis, substâncias sujeitas à combustão espontânea; e substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis:</p> <p>Subclasse 4.1: Sólidos inflamáveis, substâncias auto reagentes e explosivos sólidos insensibilizados;</p> <p>Subclasse 4.2: Substâncias sujeitas à combustão espontânea;</p> <p>Subclasse 4.3: Substâncias que, em contato com água, emitem gases inflamáveis.</p>
Classe 5	<p>Substâncias oxidantes e peróxidos orgânicos</p> <p>Subclasse 5.1: Substâncias oxidantes;</p> <p>Subclasse 5.2: Peróxidos orgânicos.</p>
Classe 6	<p>Substâncias tóxicas e substâncias infectantes</p> <p>Subclasse 6.1: Substâncias tóxicas;</p> <p>Subclasse 6.2: Substâncias infectantes.</p>
Classe 7	Material radioativo
Classe 8	Substâncias corrosivas
Classe 9	Substâncias e artigos perigosos diversos, incluindo substâncias que apresentem risco para o meio ambiente

Fonte: ANTT (2021).

2.3. Normas e Legislações associadas ao transporte de combustíveis

Existem inúmeras legislações e regras que regem o transporte terrestre de produtos perigosos. Nos tópicos a seguir serão detalhadas as principais normas técnicas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e legislações ambientais que se aplicam aos combustíveis, objeto de estudo deste trabalho.

2.3.1. Normas Técnicas

A ANTT determina na Resolução Nº 5.947/21 que no transporte terrestre de produtos perigosos, as seguintes Normas da ABNT devem ser atendidas:

- ABNT NBR 7500 – Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos;
- ABNT NBR 9735 – Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos;
- ABNT NBR 10271 – Conjunto de equipamentos para emergências no transporte rodoviário de ácido fluorídrico; e
- ABNT NBR 14619 – Transporte terrestre de produtos perigosos – Incompatibilidade química.

Para o objeto de estudo deste trabalho, a ABNT NBR 10271 não se aplica, portanto apenas as outras 3 normas serão detalhadas a seguir.

2.3.1.1. ABNT NBR 7500 - Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos

Esta norma estabelece a simbologia convencional, e também o dimensionamento específico deste sinalização, para produtos perigosos a serem aplicados nas unidades de transporte e em suas embalagens. O objetivo é indicar os riscos e os cuidados a serem tomados no transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento desses produtos.

De forma simplificada, a norma determina que a identificação de riscos para os produtos perigosos deve ser constituída de:

- Sinalização da unidade ou equipamento de transporte com rótulo de risco, painéis de segurança e demais símbolos quando aplicável;
- Afixação de rótulos de risco em suas embalagens;
- Marcação com número ONU e nome apropriado para embarque na embalagem;
- Outros símbolos e rótulos quando aplicáveis de acordo com o modal de transporte.

2.3.1.1.1. Rótulo de Risco

O rótulo de risco tem o formato de um quadrado angulado em 45°, dividido em duas metades. Sua metade superior deve conter o símbolo de identificação de risco, que é determinado no Anexo D da norma, e a metade inferior deve conter o respectivo número da classe do produto perigoso. As classificações utilizadas por essa norma são as mesmas detalhadas no tópico 2.2 deste trabalho.

Na Figura 4, está exposto o rótulo de risco da Gasolina A (gasolina pura ainda não misturada com biocombustível).

Figura 3 - Rótulo de Risco da Gasolina A



Fonte: SETON.

O símbolo determinado pela NBR 7500 para a identificação do risco associado à gasolina é a chama, como mostrado na Figura 3, e o número 3 é associado à classe dos líquidos inflamáveis da qual o produto pertence.

2.3.1.1.2. Painel de Segurança

O Painel de Segurança tem a formato retangular com o fundo de cor alaranjada com uma borda preta em todo o contorno. Sua parte superior é destinada ao número de

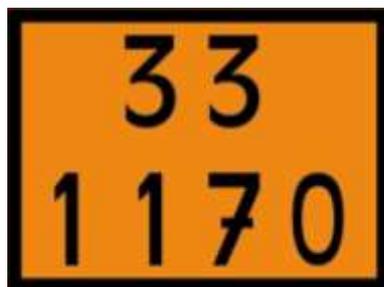
identificação de risco (número de risco) e a parte inferior para o número ONU, ambos na cor preta.

O número de risco é composto por até três algarismos (no mínimo dois) que indicam a natureza e a intensidade dos riscos, conforme estabelecido na Resolução N° 5.947/21 da ANTT. O primeiro número vai determinar o risco principal, de acordo com a mesma classificação detalhada no tópico 2.2 deste trabalho, e os riscos subsidiários serão indicados pelo segundo e terceiro algarismo. A repetição de um número pode indicar um aumento da intensidade daquele risco específico e quando o risco associado a uma substância puder ser indicado por um único algarismo de forma adequada, este será seguido por zero.

Já o número ONU é um código composto por quatro dígitos e usado para identificar materiais e artigos perigosos de acordo com as Recomendações da ONU sobre transporte de mercadorias perigosas. Esse é um número utilizado em todo o mundo e serve como um código de identificação de produtos perigosos, pois cada produto recebe um número exclusivo. Esses números são determinados no *Orange Book* da ONU, já citado anteriormente.

A Figura 4 traz o painel de segurança associado ao etanol anidro e hidratado, visto que os dois tipos de álcoois apresentam o mesmo número ONU e também mesmo número de risco associado a eles. No caso, o número de risco associado ao etanol é o 33, o primeiro algarismo 3 indica o risco principal apresentado por um líquido inflamável e a repetição do 3 no segundo algarismo indica que ele é um líquido muito inflamável, com ponto de fulgor menor que 23°C.

Figura 4 – Painel de Segurança do Etanol



Fonte: Lubrific.

2.3.1.2. ABNT NBR 9735 – Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos

A norma ABNT NBR 9735 tem por objetivo estabelecer o conjunto mínimo de equipamentos para emergências exigidos no transporte terrestre de produtos perigosos. O conjunto inclui equipamentos de proteção individual, a ser utilizado pelo condutor e pessoal envolvido no transporte; equipamentos para sinalização da área da ocorrência e extintor de incêndio portátil para a carga. Em suma, a norma determina 10 grupos de conjuntos de equipamentos de segurança e associa cada número ONU a um desses grupos. A Tabela 2 mostra os grupos de equipamentos determinados pela norma.

Tabela 2 – Grupos de Equipamentos de Segurança segundo a ABNT NBR 9735

Grupo	Equipamentos exigidos
Grupo 1	EPI básico Óculos de segurança para produtos químicos
Grupo 2	EPI básico Peça facial inteira com filtro VO/GA combinado com filtro mecânico
Grupo 3	EPI básico Peça facial inteira com filtro NH3
Grupo 4	EPI básico Peça facial inteira com filtro CO combinado com filtro mecânico
Grupo 5	EPI básico Peça facial inteira com filtro SO2 combinado com filtro mecânico
Grupo 6	EPI básico Óculos de segurança para produtos químicos Peça semifacial com filtro VO/GA combinado com filtro mecânico
Grupo 7	EPI básico Óculos de segurança para produtos químicos Peça semifacial com filtro NH3 combinado com filtro mecânico
Grupo 8	EPI básico Óculos de segurança para produtos químicos Peça semifacial filtrante
Grupo 9	Granel: EPI básico e óculos de segurança para produtos químicos Envasado (botijão e cilindros): luva compatível com o produto
Grupo 10	EPI básico Protetor facial
Grupo 11 (Produtos da classe 1)	EPI básico Colete de sinalização Peça facial inteira com filtro polivalente (VO, GA, amônia, SO2, combinado com filtro mecânico P2) ou protetor facial

Fonte: ABNT NBR 9735.

O EPI básico corresponde a capacete e luvas de material adequado ao produto transportado, definido pelo fabricante do produto. O diesel puro, por exemplo, possui número ONU 1202 e de acordo com esta norma necessita do conjunto de equipamentos de segurança determinados pelo Grupo 1.

2.3.1.3. ABNT NBR 14619 – Transporte terrestre de produtos perigosos – Incompatibilidade química

Esta Norma estabelece critérios de incompatibilidade química a serem considerados no transporte terrestre de produtos perigosos. Ao longo da norma, é estabelecido a compatibilidade ou não dos produtos de acordo com a classificação determinada pela ONU e já detalhada neste trabalho. Com base na compatibilidade ou não entre produtos é determinado se eles podem ser transportados em uma mesma unidade e quais as restrições para isso.

O Anexo A da Norma, traz uma tabela de incompatibilidade química para o transporte por meio terrestre de produtos perigosos. A Tabela 3 traz em destaque as incompatibilidades para a Classe 3 de produtos perigosos, classe da qual os combustíveis líquidos fazem parte.

Tabela 3 – Incompatibilidade química para o transporte por meio terrestre de produtos perigosos de Classe 3

Classe/ Subclasse	Classe/ Subclasse	Incompatíveis para o transporte com classe/subclasse/nº ONU
3	2.3	Apenas para os produtos da subclasse 2.3 que apresentem toxicidade por inalação LC50 < 1000 ppm
3	4.1	Apenas para os produtos com números da ONU 3221, 3222, 3231 e 3232 (auto reagentes)
3	5.1	Totalmente incompatível
3	5.2	Apenas para os produtos com números da ONU 3101, 3102, 3111 e 3112 (peróxidos orgânicos)
3	6.1	Apenas para os produtos da subclasse 6.1 do grupo de embalagem I

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14619.

A partir da Tabela 3, pode-se analisar que os líquidos inflamáveis são totalmente incompatíveis com a subclasse 5.1, por exemplo, que é a subclasse das substâncias

oxidantes. Isso é quimicamente explicado, pois os oxidantes produzem oxigênio e por isso, em caso de incêndio podem levar à combustão maciça de um evento químico. Assim, líquidos inflamáveis e substâncias oxidantes são totalmente incompatíveis, pois agindo juntos podem causar acidentes de enormes proporções (CETESB, 2022).

As demais incompatibilidades da classe 3 tratadas na tabela dizem respeito a substâncias específicas, detalhadas em norma, dos gases tóxicos (subclasse 2.3), sólidos inflamáveis, substâncias auto reagentes e explosivos sólidos insensibilizados (subclasse 4.1), peróxidos orgânicos (subclasse 5.2) e substâncias tóxicas (subclasse 6.1).

2.3.2. Legislação Ambiental

A legislação ambiental que se aplica no transporte de combustíveis e todo produto perigoso é a Instrução Normativa do IBAMA 5/12. Essa norma é uma autorização ambiental para transporte de produtos perigosos que é um documento emitido pelo Ibama com validade de 3 meses que autoriza transportadores a realizarem a atividade de transporte marítimo e de transporte interestadual, terrestre ou fluvial, de produtos perigosos.

Transportadores que realizarem a atividade apenas dentro de um único estado deverão seguir as regras de licenciamento ambiental editadas pelo respectivo órgão estadual do meio ambiente.

O documento, conhecido como "Autorização Ambiental de Transporte Interestadual de Produtos Perigosos", será emitido para pessoas jurídicas e físicas que atendam aos requisitos para emissão do Certificado de Regularidade Ambiental, de acordo com as regras do Cadastro Técnico Federal de Atividades Potencialmente Poluidoras ou Utilizadoras de Recursos Ambientais (CTF).

O CTF é o registro obrigatório de pessoas físicas e jurídicas que realizam atividades passíveis de controle ambiental, como por exemplo o transporte de combustíveis. Logo, para obter a documentação do Ibama, a transportadora também necessita ter o CTF regularizado.

2.3.3. Regulamentação de Caminhão Tanque

Além das regras gerais que as empresas de transporte devem seguir para movimentar os produtos perigosos, existem algumas regras específicas para a operação,

carga e descarga dos caminhões tanques, veículo mais utilizado no transporte rodoviário de combustíveis líquidos no país.

Primeiramente, vale definir o que é um caminhão tanque. Ele é um veículo equipado com um grande reservatório para transporte de líquidos ou materiais pulverizados, pode ter até 3 compartimentos para carregar diferentes produtos e tem em média capacidade para 50 mil litros. Em geral, é utilizado para transporte de produtos perigosos como ácidos, produtos químicos e os combustíveis. E por isso, existe uma legislação específica para eles (INAFLEX, 2021).

Os tanques desses caminhões são geralmente fabricados com aço-carbono e precisam estar sempre com as vistorias em dia principalmente visando o isolamento térmico, reduzindo ao máximo a quantidade de calor com a qual o material terá contato, e a proteção contra vazamentos, além de levar à perda de material o vazamento traz severos riscos ao meio ambiente e sociedade: corrosão de estradas, intoxicação de humanos e animais e contaminação de solos e águas (INAFLEX, 2021).

O órgão regulamentador é o CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) e algumas das exigências são: certificação de verificação metrológica conforme regulamento do INMETRO para atestar a capacidade volumétrica do tanque; e atendimento à Resolução do CONTRAN nº 211/06, que estabelece que veículos com peso bruto total combinado superior a 57 t, somente poderão circular portando uma autorização específica chamada Autorização Especial de Trânsito (AET).

Além disso, o CONTRAN determina que para a utilização de caminhão tanque no transporte de substâncias perigosas os motoristas deverão ter uma formação específica conhecida por MOPP (Movimentação Operacional de Produtos Perigosos). Com a qualificação MOPP, os motoristas recebem informações direcionadas para que tornem-se responsáveis no trânsito ao transportar cargas perigosas, aumentando a segurança do próprio motorista e dos outros envolvidos no processo e contribuindo para a redução do risco de acidentes.

2.4. A cadeia logística de distribuição de combustíveis

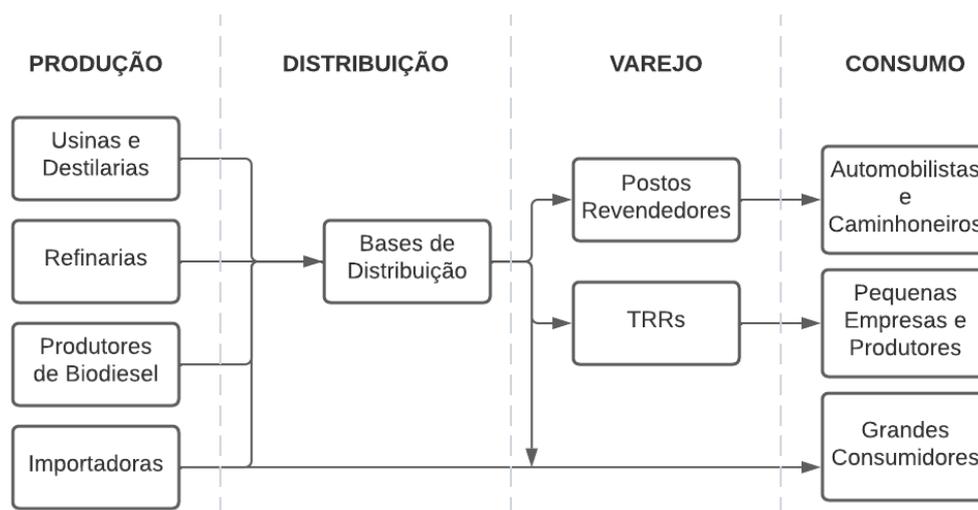
A cadeia logística de distribuição de combustíveis líquidos no país engloba os agentes relacionados à produção, distribuição, varejo e consumo. Os produtores são constituídos pelas refinarias de petróleo, usinas e destilarias de álcool, usinas de produção

de biodiesel e pelos importadores que fornecem produto para comercialização interna no país.

As bases de distribuição, como já adiantado anteriormente, tem a função de intermediar o produto entre a produção e a venda para o consumidor final. Elas armazenam produto de forma estratégica para alimentar a rede varejista. Em seu trabalho, JÚNIOR (2008) determina que os varejistas são, em suma, postos revendedores ou TRRs (transportadores revendedores retalhistas) que são aquelas empresas autorizadas pela ANP a adquirir grande quantidade de combustível a granel e depois revender no varejo. Os postos são responsáveis por abastecer os automobilistas e caminhoneiros e os TRRs abastecem pequenas empresas e produtores em geral.

Por fim, os grandes consumidores normalmente se abastecem diretamente dos agentes importadores, mas também podem consumir produto das bases de distribuição. A Figura 5 mostra um fluxograma que resume a cadeia logística de combustíveis do Brasil.

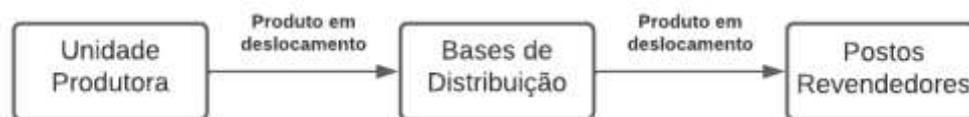
Figura 5 – Cadeia logística de abastecimento de combustíveis no Brasil



Fonte: Adaptado de JÚNIOR (2008).

É importante notar que as setas do fluxograma indicam deslocamento de produto, sendo essas as etapas da cadeia mais expostas a riscos no processo. Durante o deslocamento, o produto fica submetido a fatores externos não controláveis, mudanças climáticas, altas temperaturas, colisões do veículo transportador, entre outros fatores que serão detalhadas ao longo deste trabalho. Para fins de estudo deste relatório, consideraremos apenas uma cadeia simplificada, detalhada na Figura 6.

Figura 6 – Cadeia logística de distribuição de combustíveis simplificada



Fonte: autoria própria.

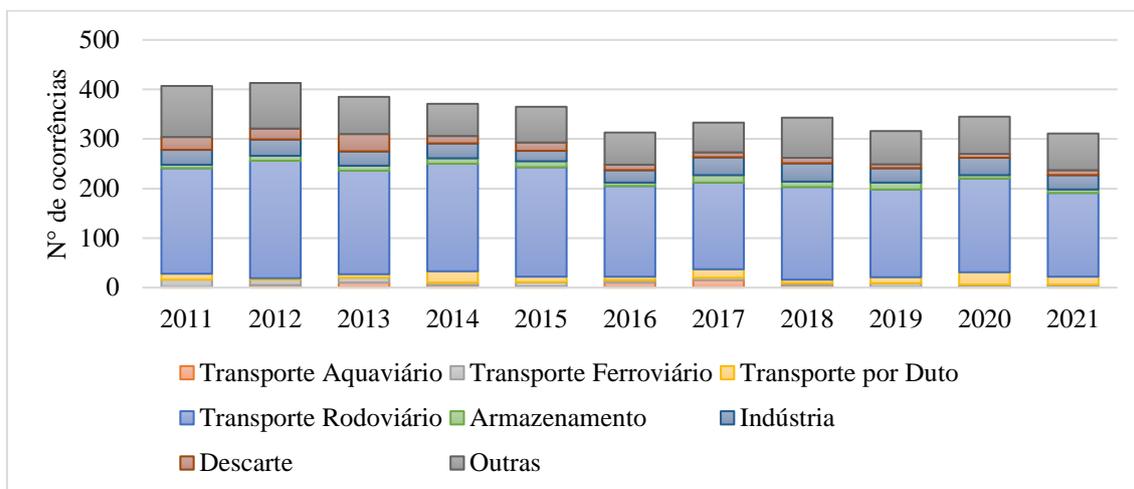
2.5. Acidentes no transporte rodoviário de combustíveis

De acordo com Ramos (1997), a prevenção dos acidentes com produtos perigosos pode ocorrer nas várias fases do processo: produção, transporte, transformações, utilização e disposição final, mas o maior risco corre no transporte, pois expõe o produto a situações imprevisíveis.

Ramos (1997) expõe em seu trabalho os principais fatores que elevam o risco de acidentes no momento do transporte de produtos químicos: acidentes com outros veículos, condições de transporte e do trânsito, traçado da pista e de sua manutenção, habilidade e condição do motorista. Além disso, condições climáticas como calor excessivo ou chuvas intensas também podem afetar o transporte e contribuir para um possível acidente.

Através dos dados históricos de ocorrências atendidas pela CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), pode-se comprovar que a maioria dos acidentes com produtos químicos realmente acontece durante o transporte, especialmente o rodoviário. Na Figura 7 tem-se um gráfico que mostra o número de ocorrências registradas pela CETESB por ano, nos últimos 11 anos, separadas por atividade no momento do acidente. No total, pode-se observar que desde 2011 até o fim de 2021 cerca de 56% dos acidentes com produtos perigosos, com ocorrência registrada, aconteceram durante o transporte rodoviário.

Figura 7 – Ocorrências de acidentes com produtos perigosos registradas pela CETESB nos últimos 11 anos



Fonte: Adaptado de CETESB (2022).

No ano de 2022, apenas em janeiro, segundo dados da CETESB, teve-se 9 acidentes com produtos perigosos registrados, sendo que 6 deles ocorreram durante o transporte rodoviário. Além dos números expressivos, chama a atenção também as consequências que acidentes com esse tipo de produto podem gerar.

Além das consequências diretas de um capotamento ou colisão veicular, os produtos químicos elevam o risco de fatalidades quando ocorrem vazamentos. A exposição de um combustível ao ambiente, por exemplo, pode gerar explosões, incêndios e a contaminação do solo e de leitos de água.

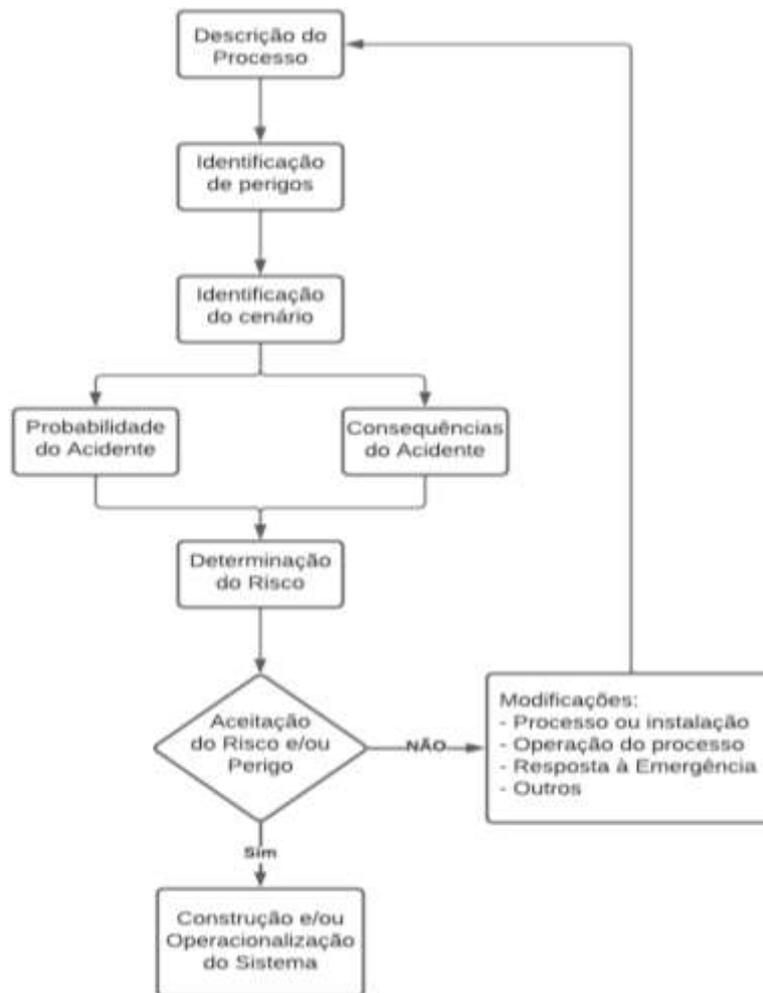
Portanto, é evidente a necessidade de um planejamento que abranja todas as etapas da cadeia logística de distribuição de combustíveis, pois o risco associado ao transporte já é muito elevado apenas por se tratar de um produto perigoso.

2.6. Identificação de Perigos e Análise de Riscos

O IPAR (Identificação de Perigos e Avaliação de Riscos), de acordo com o CCPS (*Center for Chemical Process Safety* ou Centro para Segurança de Processos Químicos do Instituto Americano de Engenheiros Químicos), é um termo que inclui todas as atividades envolvidas na identificação de perigos e na análise de riscos de uma instalação ou processo. Para Crowl e Louvar (2002), as terminologias para as etapas do IPAR variam consideravelmente, mas a Figura 8 traz o fluxograma que ilustra o procedimento comum

segundo eles, e que será considerado ao longo deste trabalho, para a identificação de perigos e análise de risco.

Figura 8 – Processo de Identificação de Perigos e Avaliação de Risco



Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2002).

O CCPS, em seu guia “Diretrizes para a Segurança de Processos baseada em Risco”, afirma que para gerenciar riscos é necessário que estes estejam identificados. Por isso, a primeira etapa visando a segurança de um processo deve ser a identificação dos riscos e perigos que ele envolve. Após isso, os riscos devem ser avaliados e determinados como toleráveis ou não de acordo com as diretrizes da instituição que realizará tal atividade. O profundo conhecimento do risco, adquirido ao longo desse processo, será determinante para as demais atividades de gestão de segurança assumida pela instalação.

De acordo com o CCPS, o procedimento IPAR pode ser realizado em qualquer etapa ou estágio do ciclo de um projeto, porém o mais indicado é que a análise seja feita antes de o procedimento realmente acontecer. Antecipando o IPAR, é possível inibir que

acidentes evitáveis ocorram e também, é mais vantajoso economicamente, visto que qualquer mudança necessária ao processo terá menos custo antes que ele esteja de fato acontecendo.

O IPAR é geralmente realizado por uma equipe de especialistas qualificados tanto no processo quanto nos materiais e atividades envolvidas (CCPS, 2014). De acordo com Castro (2015), existe um líder do procedimento, chamado de Gerente de Risco, que geralmente possui experiência na identificação e avaliação de riscos, e irá guiar a execução e escolha das metodologias. Quando o estudo estiver completo, a gestão aprova ou não a implementação das medidas de redução de risco recomendadas.

Para isso, o estudo tem como produtos finais relatórios completos de análise de risco que incluem a documentação de todos os riscos do processo ou atividade, os critérios de tolerância de risco, medidas de controle de possíveis riscos, resoluções e ações implantadas e os riscos residuais após as medidas de controle serem tomadas.

Segundo Crawl e Louvar (2002), para cada processo que envolva o uso de produtos químicos, as seguintes perguntas devem ser respondidas:

- a. Quais são os perigos?
- b. O que pode dar errado e como?
- c. Qual é a probabilidade de dar errado?
- d. Quais são as consequências?

A primeira pergunta está diretamente ligada com a etapa de identificação do perigo e as últimas três estão relacionadas com a avaliação de risco. A seguir, essas duas macro etapas serão detalhadas juntamente com as metodologias que são comumente utilizadas em cada uma delas. Existem inúmeras metodologias que podem ser aplicadas nesse processo, porém para fins deste trabalho serão descritas as metodologias que mais se aplicam ao nosso objeto de estudo: transporte rodoviário de combustíveis líquidos.

2.6.1. Identificação de Perigo

A função principal desta etapa é tornar todos os riscos envolvidos no processo conhecidos. Esta etapa pode ser realizada isoladamente, mas para um resultado mais eficaz é fundamental que seja seguida de uma avaliação de riscos para que os riscos com maior probabilidade de ocorrência sejam priorizados (CROWL e LOUVAR, 2002).

Como já ressaltado anteriormente, muitos métodos estão disponíveis para a realização desta etapa. Nenhuma das abordagens é mais adequada que a outra necessariamente, a escolha do melhor método exige experiência (CROWL e LOUVAR, 2002). Dentre as metodologias disponíveis se destacam: *Checklist*, *What-If* e HAZOP.

2.6.1.1. *Checklist*

O popularmente chamado *Checklist* se traduzido para o português nada mais é do que uma Lista de Verificação. Essa lista deve conter os possíveis problemas e áreas que devem ser verificadas ao longo de um processo ou atividade. O *Checklist* pode ser usado durante um projeto, visando a verificação de itens já identificados previamente como perigosos, ou antes do início de uma nova operação, com o intuito de identificar os pontos de riscos e permitir a implementação de melhorias em futuras etapas de análise do processo (CROWL e LOUVAR, 2002).

Essa é uma análise geral e qualitativa, ideal como primeira abordagem na construção de um procedimento de segurança. Geralmente, os *Checklists* são construídos em reuniões de *brainstorming* (no português “tempestade cerebral”, é uma técnica, segundo a Oxford Languages, de discussão em grupo que se vale da contribuição espontânea de ideias por parte de todos os participantes) entre os responsáveis pelo processo com o objetivo de identificar riscos e gerar soluções para eles. É indicado que participem membros de diferentes setores que estejam envolvidos na atividade para permitir uma maximização dos resultados (CASTRO, 2015).

A organização e aparência do *Checklist* vai depender do intuito da sua utilização. Em geral, para verificação de itens já previamente identificados como perigosos, ele traz apenas uma coluna para acompanhamento. Porém, quando é utilizado na construção de um processo de segurança, podem aparecer mais colunas. A Figura 9 traz um exemplo de *Checklist*, fornecido por Crowl e Louvar (2002), em que a primeira coluna é usada para indicar as áreas que já foram investigadas, a segunda para os itens que não se aplicam ao processo e a terceira, para as áreas que ainda necessitam de investigação.

Figura 9 – Checklist típico de segurança de processos

	Concluído	Não se aplica	Exige mais estudo
Arranjo Geral			
1. Áreas drenadas adequadamente?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Existem corredores de acesso?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Obstruções subterrâneas perigosas?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Entradas e saídas de emergência?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Altura livre suficiente?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2002).

2.6.1.2. *What-If* (WI)

O procedimento *What-If* (ou, em português, E se?) também é uma técnica de análise geral, qualitativa, cuja aplicação é fortemente indicada em primeira instância na detecção de riscos, tanto na fase de processo, projeto ou pré-operacional (CASTRO, 2015).

De acordo com Castro (2015), a técnica se desenvolve através de reuniões entre duas equipes promovendo questionamentos do tipo “E se?”. A equipe questionadora é a conhecedora do sistema a ser analisado e a segunda equipe, que responderá as questões, deve ter funções também relacionadas com o sistema. A aplicação do *What-If* resulta em um largo espectro de riscos, assim como a geração de possíveis soluções para os problemas levantados. Por isso, é interessante a presença de duas equipes para a busca de um consenso entre as áreas quanto a forma mais segura de operacionalizar o processo.

De Cicco e Fantazzini (1994) sugerem alguns passos básicos para a aplicação da técnica que envolvem: formação do comitê; planejamento prévio dos pontos a serem abordados; reunião organizacional para definição de metas e alinhamento de expectativas; reunião de revisão do processo para membros do comitê não familiarizados; reunião de formulação de questões; reunião de resposta às questões; e elaboração de relatório de revisão dos riscos do processo. O consenso do grupo é fundamental para a identificação de perigos se fortalecer.

A Tabela 4 traz um exemplo de construção de perguntas e respostas com a técnica *What-If* para uma atividade fictícia de confraternização de uma empresa.

Tabela 4 – Identificação de perigos em uma confraternização de empresa pela técnica *What-If*

E se?	Perigo/Consequência	Medida de controle de risco/emergência
Vierem mais pessoas que o esperado?	Falta de espaço, bebida e comida.	Solicitar confirmação com antecedência, individualizar convites, prever folga de alimentos.
As pessoas não encontrarem o local da festa?	Desagradar amigos, clima de insatisfação, não receber presentes, perder alimentos.	Anexar mapa aos convites, acrescentar número de telefone.
Faltar energia?	Paralisar a festa.	Alugar gerados.

Fonte: Adaptado de CASTRO (2015).

2.6.1.3. HAZOP

A palavra HAZOP tem origem do inglês “*Hazard and Operability Study*”, traduzindo para o português temos “Estudo de Perigos e Operabilidade”. Dessa forma, o HAZOP é um método detalhado para análise sistemática de um processo ou operação bem definido, que esteja sendo planejado ou que já exista (CRAWLEY e TYLER, 2015). A análise resulta em uma ampla gama de cenários de risco a serem considerados e já engloba conceitos das metodologias *Check-List* e *What-If* em sua execução. Também é possível combinar o método com outras ferramentas, como a Matriz de Risco, para uma análise mais completa e específica aos objetivos do estudo. O estudo HAZOP e a Matriz de Riscos serão detalhados e aplicados nos próximos tópicos deste trabalho.

2.6.2. Avaliação de Riscos

Para Crowl e Louvar (2002), a avaliação de risco inclui a identificação de incidentes e uma análise de consequências. A identificação do incidente descreve como um acidente pode ocorrer e a análise das suas consequências diz qual deve ser o dano esperado. A avaliação de risco frequentemente inclui uma análise probabilística que tem como objetivo prever a chance de um perigo identificado realmente acontecer, fator este que é norteador para as medidas de segurança e prioridades que serão tomadas nas próximas etapas.

A seguir serão detalhadas duas metodologias probabilísticas, a Análise por Árvore de Falhas (AAF) e a Análise por Árvore de Eventos (AAE), e uma última metodologia que mostra como as frequências dos eventos são usadas para estudo. Esta última

metodologia se chama Análise de Camada de Proteção, do inglês *Layer of Protection Analysis* (LOPA).

2.6.2.1. Árvore de Falhas (AAF)

As Árvores de Falhas são um método dedutivo para a identificação das maneiras pelas quais os perigos podem causar acidentes. A abordagem sempre começa com um evento bem definido, chamado de evento topo, e retrocede em direção aos vários cenários que podem ser responsáveis pelo acidente de fato acontecer (CROWL e LOUVAR, 2002).

De acordo com Barros (2013), o objeto de estudo da AAF são os sistemas e seus focos são o evento topo e as sequências de eventos que são responsáveis por ele existir. A seleção do evento topo deve acontecer por qualquer técnica de identificação de perigos e a partir dele, serão construídos níveis subsequentes, identificando falhas que podem ocasionar na ocorrência do evento topo. As falhas podem ser aleatórias, de modo comum, humanas ou por questões específicas de equipamentos. A Figura 10 traz um exemplo de Árvore de Falhas para o evento topo identificado como “Pneu Furado”.

Figura 10 – Exemplo de Árvore de Falhas



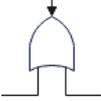
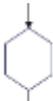
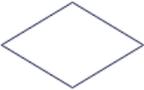
Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2002).

Os círculos representam os eventos básicos e os retângulos os eventos intermediários. Já a forma que se assemelha a um peixe, representa a função lógica OU, logo, significa que qualquer evento de entrada fará com que o evento de saída ocorra. Como por exemplo, na Figura 10 a falha do pneu pode ser causada tanto por um pneu defeituoso quanto por um pneu gasto (CROWL e LOUVAR, 2002). A Tabela 8 traz os componentes que geralmente são utilizados na construção de uma AAF e uma breve descrição do seu significado.

A análise qualitativa do processo pode ser realizada com base nas simbologias apresentadas na Tabela 5. Elas ditarão as relações e dependências entre eventos. Porém, para a análise quantitativa é necessário ter em mãos as probabilidades de cada evento acontecer e utilizar das regras de distribuição de probabilidade (CASTRO, 2015).

Ainda de acordo com Castro (2015), a AAF não precisa necessariamente ser levada a uma análise quantitativa, pois apenas com a construção da árvore já é possível extrair informações muito valiosas e claras sobre o processo.

Tabela 5 – Componentes utilizados na construção de uma AAF

Símbolo	Representação	Observação
Módulo "OU" (+) U		Indica que uma ou mais das entradas determinantes estiverem presentes, a proposição será verdadeira e resultará uma saída. A proposição será falsa se, e somente se, nenhuma das condições estiver presente.
Módulo "E" (X) \cap		Indica que todas as entradas determinantes devem estar presentes para que a proposição seja verdadeira. Se uma das condições estiver faltando, a proposição será falsa
Módulo de Inibição		Permite aplicar uma condição ou restrição à sequência. A entrada e a restrição devem ser satisfeitas para que se gere uma saída.
Evento Básico		Um evento, usualmente um mau funcionamento, descrito em termos de componentes.
Evento		Identificação de um evento particular topo ou intermediário. Quando em uma sequência, geralmente descreve a entrada ou saída de "E" ou "OU".
Evento não desenvolvido		A partir dele o evento não se desenvolve por falta de informação ou de consequência suficiente.
Evento Casa		Normalmente é um evento que sempre acontece, a não ser que ocorra alguma falha.
Conexão		Símbolo de conexão a outra parte da árvore. (Entrada e Saída respectivamente).

Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2002).

2.6.2.2. Árvore de Eventos (AAE)

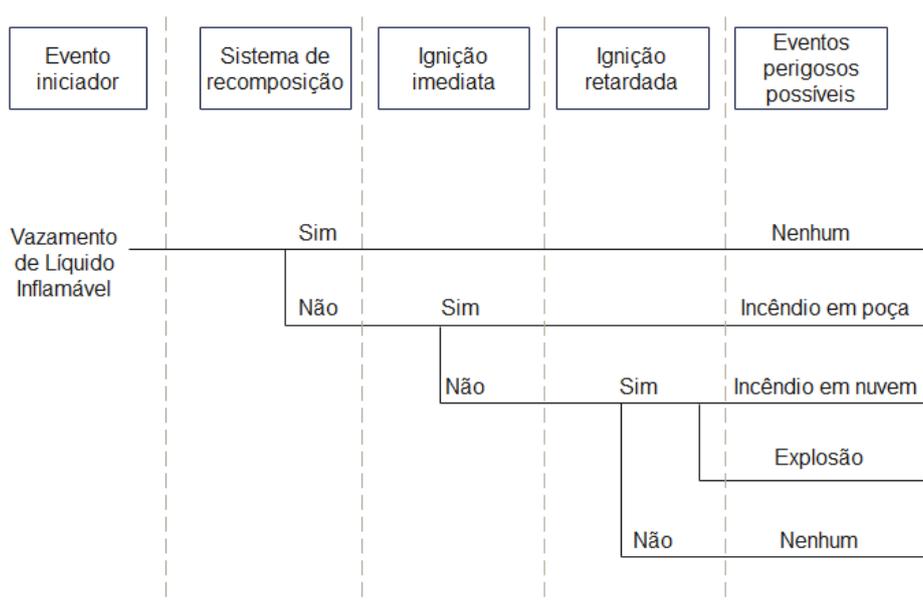
A Análise por Árvore de Eventos trabalha com uma abordagem indutiva, onde um evento inicial é escolhido e a partir dele, identifica-se uma sequência de eventos em direção a um resultado final. O método fornece informações sobre como a falha pode ocorrer e a probabilidade de que ela ocorra (CROWL e LOUVAR, 2002).

De acordo com Barros (2013), a AAE tem como objeto de estudo as áreas e os sistemas de controle de emergência e o seu foco está nos eventos iniciadores e na série de eventos decorrentes a partir dele. Ao contrário da AAF que é dedutiva, ou seja, segue para trás, a AAE por ser indutiva segue para frente, avançando nos desdobramentos a partir de um evento inicial.

Para Crowl e Louvar (2002) as etapas típicas de uma análise por árvore de eventos são: identificação do evento inicial de interesse; identificação das funções de segurança projetadas para lidar com o evento inicial; construção da árvore de eventos; e descrição das sequências de eventos de acidentes resultantes.

Além disso, se os dados estiverem disponíveis, também é possível fazer uma análise quantitativa probabilística, da mesma maneira como na AAF. A probabilidade também é usada nessa análise para priorização e definição das melhorias necessárias (CROWL e LOUVAR, 2002).

Figura 11 – Exemplo de Árvore de Eventos para vazamento de líquido inflamável



Fonte: Adaptado de BARROS (2013).

Pela Figura 11, é possível notar como a análise caminha para a frente, identificando eventos que possam vir a ocorrer a partir do evento iniciador. No exemplo, o sistema de recomposição que estancaria o vazamento pode ter sucesso (“Sim”) ou pode fracassar (“Não”). Se ele fracassa, ou ocorre o incêndio em poça ou não ocorre. Para a segunda possibilidade, há três cenários possíveis: incêndio em nuvem, explosão ou dispersão, a partir da qual nenhum evento perigoso ocorre (BARROS, 2013).

2.6.2.3. LOPA

A sigla LOPA é derivada da expressão em inglês *Layers Of Protection Analysis*, que traduzido ao português significa Análise de Camadas de Proteção. Segundo o CCPS, essa metodologia é uma técnica de análise de riscos destinada a avaliar o grau de risco em diferentes cenários de acidentes, levando em consideração camadas independentes de proteção (IPLs) e também a existência de barreiras suficientes para a proteção do cenário analisado.

As IPLs nada mais são do que ferramentas, sistemas ou estruturas que existem dentro do cenário e contribuem para diminuir a ocorrência do possível acidente analisado. O procedimento para implementação do método e as análises realizadas dentro dele serão discutidas mais adiante em outros tópicos deste trabalho.

3. METODOLOGIAS

Ao longo deste capítulo serão detalhadas as metodologias e ferramentas utilizadas para identificação de perigos e análise de risco que serão posteriormente aplicadas em um estudo de caso e os procedimentos para aplicação das mesmas.

As metodologias selecionadas foram a HAZOP, para identificação de perigos, e o estudo LOPA, para a avaliação de riscos. A ferramenta Matriz de Risco também será detalhada, visto que será utilizada para complementar a análise realizada no estudo HAZOP. Além disso, será apresentado um software de simulação de cenários que será usado mais adiante também neste trabalho.

3.1. HAZOP

Na análise HAZOP, os perigos podem ser identificados a nível de segurança ou do ambiente. Os problemas de operabilidade podem danificar equipamentos, causar pausas na produção, gerar desperdícios de produto e dinheiro, culminar em produtos fora de especificação e etc. Todos esses problemas causam custos elevados para a operação, além de colocar a vida dos funcionários e ambiente em risco, portanto, devem ser identificados e evitados (FONSECA, 2016).

O procedimento de um estudo HAZOP deve englobar todos os aspectos relacionados ao processo ou operação em questão. Dessa forma, todas as informações referentes ao processo devem estar disponíveis antes do início do estudo, isso inclui: diagramas de fluxo atualizados, diagramas de processo e instrumentações, informações detalhadas dos equipamentos, materiais e balanços de massa e energia, quando fizerem sentido (CROWL e LOUVAR, 2002).

De acordo com Fonseca (2016), para operações contínuas, normalmente divide-se o processo em etapas, que serão constituídas por nós, pontos específicos do processo que serão analisados. Já para operações descontínuas, divide-se em etapas sequenciais e a análise é feita por ordem cronológica.

Para a realização do estudo, analisa-se um possível desvio em um parâmetro-chave com base em uma palavra-guia. Crawler e Tyler (2015) trazem algumas definições para parâmetros e palavras-guia que serão utilizadas ao longo deste trabalho e aparecem descritos nas Tabelas 5 e 6, respectivamente.

Tabela 6 – Exemplos de possíveis parâmetros da operação

Fluxo	Agitação	Reação	Separação
Pressão	Transferência	Composição	Tempo
Temperatura	Nível	Adição	Envelhecimento
Mistura	Viscosidade	Monitoramento	Fase
pH	Sequência	Sinal	Comunicação
Velocidade	Dimensão de partículas	Medição	Controle

Fonte: Adaptado de CRAWLER e TYLER (2015).

Tabela 7 – Palavras-guia e seus respectivos significados

Palavras-Guia	Significado
Não, Nenhum	Nenhuma intenção do projeto é alcançada
Mais, Maior	Aumento quantitativo do parâmetro
Menos, Menor	Diminuição quantitativa do parâmetro
Bem como	Ocorre uma atividade adicional
Parte de	Apenas uma parte do objetivo do projeto é alcançada
Reverso	Oposição lógica ao objetivo do projeto
Além de, Outro	Completa substituição: ocorre outra atividade ou existe uma condição incomum

Fonte: Adaptado de CRAWLER e TYLER (2015).

A combinação das palavras-guia com os parâmetros gera os desvios do processo que serão analisados ao longo do estudo HAZOP. A Tabela 7 traz alguns exemplos de combinações e os respectivos desvios que podem gerados a partir delas.

Tabela 8 – Exemplos de desvios resultantes da combinação de parâmetros com palavras-guia

Parâmetro	Palavras-Guia	Desvios significativos
Fluxo	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos fluxo
	Mais	Mais fluxo
	Reverso	Fluxo reverso
Nível	Mais	Nível alto
	Menos	Nível baixo
Reação	Mais	Reação descontrolada
	Menos	Reação incompleta
	Nenhuma	Nenhuma reação

Fonte: Adaptado de CRAWLER e TYLER (2015).

De acordo com Crowl e Louvar (2002), pode-se resumir o procedimento HAZOP, para a conclusão de uma análise, às seguintes etapas: começa-se com um fluxograma detalhado do processo e define-se uma unidade para estudo; em seguida, determina-se um nó dentro dessa unidade; descreve-se a intenção do projeto no nó de estudo; define-se um parâmetro para análise; aplica-se uma palavra-guia ao parâmetro para sugerir possíveis desvios; se o desvio for aplicável, determina-se as possíveis causas e observa-se quaisquer sistemas de proteção já existentes; avalia-se as consequências do desvio, caso existam; recomenda-se uma ação com responsáveis e prazos afim de minimizar ou mitigar o desvio; e por fim, registra-se todas essas informações em um formulário HAZOP.

O procedimento deve ser repetido até que todas as palavras-guia aplicáveis tenham sido utilizadas, assim como todos parâmetros de processo aplicáveis, para o mesmo nó. Só então, segue-se para os próximos nós da unidade de estudo selecionada e apenas após isso, para a próxima seção do fluxograma.

A técnica HAZOP foi desenvolvida especificamente para as indústrias químicas e de processo (CRAWLEY e TYLER, 2015) porém, é indicado também para projetos e modificações independente do porte, visto que muitos acidentes ocorrem porque se subestimam pequenos detalhes que à primeira vista podem parecer inofensivos (CASTRO, 2015).

A equipe formada para realização do estudo deve ser constituída por uma combinação de funcionários de áreas diferentes e com níveis de experiência e contato com o processo distintos, de forma a obter-se uma equipe multidisciplinar. Um time típico para o estudo é formado por um líder, engenheiros de projeto e processo, gerentes de operação e operadores. A natureza e a complexidade do processo impactam diretamente na quantidade e diversidade dos membros da equipe (FONSECA, 2016).

A principal vantagem desta metodologia é o fato dela fornecer uma identificação mais completa dos perigos, identificando suas causas e possíveis consequências (CRAWLEY e TYLER, 2015). Além disso, ao envolver diversas áreas promove um maior entendimento acerca do processo e a troca de ideias entre os membros da equipe. Em contra partida, o processo é muito longo e demorado e a diversidade da equipe ser uma exigência traz uma dificuldade a mais para a execução do procedimento, podendo ser vista também como uma desvantagem, já que sem um bom líder e uma boa equipe, a chance de o procedimento gerar bons resultados é muito pequena (CASTRO, 2015).

A fim de exemplificar o estudo, a Figura 12 traz um exemplo genérico de parte de um formulário HAZOP feito para um reator em operação dentro de uma indústria

química. No exemplo foi considerado o sistema de refrigeração como nó a ser analisado e é detalhado os desvios e possíveis causas e consequências para apenas uma palavra-guia.

Figura 12 – Exemplo de estudo HAZOP aplicado a um reator exotérmico

Nome do projeto:			Data:	Página de:	Concluído:	
Processo:			Nenhuma ação:			
Seção:			Desenho de referência:		Data da resposta:	
Ponto de estudo (nó)	Parâmetros do processo	Desvios (palavra-guia)	Possíveis causas	Possíveis consequências	Ação requerida	Atribuída a
Trânsito do exatimbitio-lanque carregado	Temperatura	Nenhum	1. Válvula de controle falha e permanece fechada 2. Bombas de refrigeração obstruídas 3. Falha no fornecimento de água de refrigeração 4. O controlador falha e fecha a válvula 5. Falha na pressão do ar, fechando a válvula	1. Perda de resfriamento, possível 2. * 3. * 4. * 5. *	1. Selecionar a válvula que falhou para abrir 2. Instalar medidor de vazão de água e alarme de vazão para alertar o operador 3. Verificar e monitorar o serviço de água 4. Colocar o controlador na lista de instrumentação crítica 5. Selecionar a válvula que falhou para abrir	

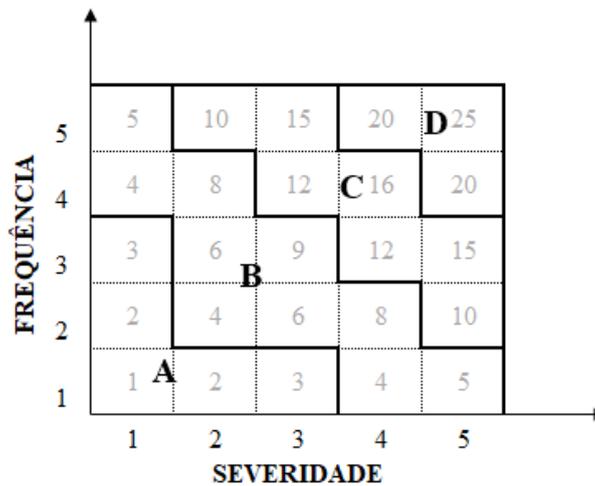
Fonte: Adaptado de (CRAWLEY e TYLER, 2015).

3.2. Matriz de Risco

De acordo com Pinheiro e Martins (2020), a matriz de riscos é uma ferramenta gráfica que trata qualitativamente os riscos através de classificações determinadas através de níveis de risco. Com base na classificação obtida por um cenário, é possível guiar e priorizar ações dentro da instalação analisada.

Uma forma possível de se construir uma matriz é a partir da combinação entre pesos atribuídos à frequência e à severidade dos cenários analisados. A combinação do peso frequência com o peso severidade irá gerar um nível de risco (DE PAULO, 2006). A Figura 13 traz um exemplo de matriz de riscos onde é possível enxergar como a combinação dos pesos resulta em um nível de risco.

Figura 13 – Exemplo de Matriz de Risco



Fonte: Adaptado de DE PAULO (2006).

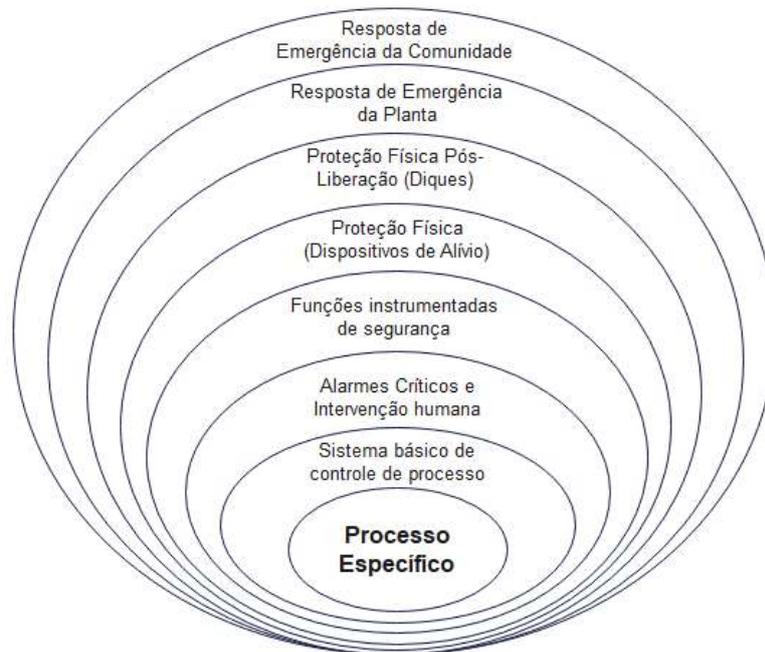
No caso da figura, as áreas A, B, C e D do gráfico representam níveis de risco diferentes: A – baixo risco; B – médio risco; C – alto risco e D – risco extremo. Portanto, a matriz permite uma análise direta de quais cenários necessitam de ação imediata e quais podem ser gerenciados sem tanta urgência.

A Matriz de Risco é uma ferramenta de análise de cenários que pode ser utilizada em conjunto com outras metodologias e ferramentas para obtenção de resultados mais completos e embasados.

3.3. Análise de Camada de Proteção (LOPA)

A LOPA, de acordo com o CCPS, é uma forma simplificada de avaliação de risco, pois, utiliza categorias de ordem de grandeza para a frequência do evento iniciados, a gravidade de suas consequências e a probabilidade de falha das camadas de proteção independentes (IPLs) para estimar o risco de um cenário. A Figura 14 ilustra como as camadas de proteção são esquematizadas para diminuir a frequência de um cenário de acidente específico.

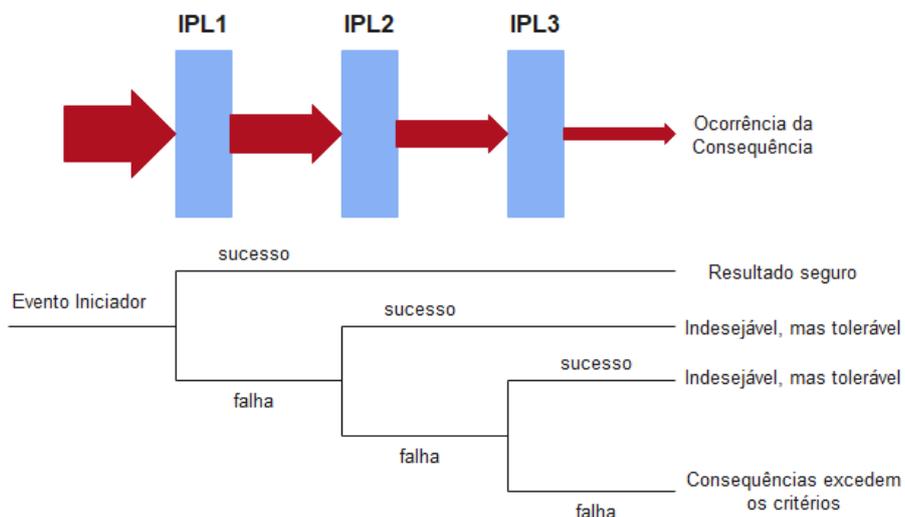
Figura 14 – Camadas de Proteção em um cenário específico de acidente



Fonte: Adaptado de CROWL e LOUVAR (2002).

O objetivo principal do estudo é determinar se existem camadas de proteção suficientes para que um cenário acidental se torne tolerável. Isso é possível através de uma base de dados consistente que determinará se há IPLs suficientes para controlar o risco de um determinado cenário. A LOPA não sugere quais devem ser as IPLs adicionadas, porém auxilia a avaliação entre alternativas visando a diminuição do risco (CCPS, 2021).

Figura 15 – Comparação entre Árvore de Eventos e LOPA



Fonte: Adaptado de CCPS (2021).

Fazendo uma comparação com a árvore de eventos, vemos na Figura 15 que a espessura das setas vermelhas são proporcionais a frequência da consequência se a IPL anterior não for bem sucedida. Portanto, pode-se concluir que cada IPL diminui significativamente a frequência das consequências, mesmo que não consiga mitigá-las. Na prática o analisador que aplicar a LOPA não terá a árvore de eventos pronta para iniciar a análise, ele terá que iniciar a partir de um cenário identificado na etapa de identificação de perigos (CCPS, 2021).

De acordo com o Centro para Segurança de Processos Químicos do Instituto Americano de Engenheiros Químicos, a LOPA pode ser desenvolvida de acordo com algumas etapas que serão detalhadas a seguir.

Etapa 1: identificação das consequências para escolha dos cenários a serem analisado. Essa etapa é normalmente realizada com base em análises qualitativas como as tratadas no tópico 3.1.1 deste trabalho, um exemplo seria o estudo HAZOP.

Etapa 2: determinação do cenário a ser analisado. Dentre os cenários identificados na Etapa 1, é necessário escolher apenas um. O LOPA é aplicado apenas a um cenário de cada vez.

Etapa 3: identificação do evento iniciador do cenário e determinação da frequência do evento iniciador, em eventos por ano. O evento iniciador deve causar a consequência considerando a falha de todas as IPLs. Para trazer consistência aos dados da LOPA, muitas empresas fornecem orientações e dados históricos para orientar a determinação da frequência dos eventos iniciadores. Assim, existem muitas bases de dados onde pode-se consultar a frequência de ocorrência dos eventos iniciadores mais comuns para esse estudo. A CCPS fornece em seu livro “Análise de Camada de Proteção: Avaliação simplificada do risco de processo” uma dessas bases que é trazida no ANEXO 1 deste trabalho e será usada em análises futuras.

Etapa 4: identificação das IPLs e estimativa da probabilidade de falha durante a demanda (PFD) de cada uma delas. Em suma, para ser considerada uma IPL o dispositivo, sistema ou ação deve ser eficaz na prevenção da consequência independente do evento iniciador ou de qualquer componente ou IPL já demandada no mesmo cenário. Além disso, a eficácia de prevenção deve ser auditável, ou seja, capaz de ser validada de alguma maneira: documentação, avaliação, testes, etc. Para a determinação da PFD, assim como no caso da frequência do evento iniciador, existem diversas bases de dados fornecidas por empresas e centros de estudo que podem ser utilizadas para embasar a LOPA. Neste trabalho serão utilizados dados fornecidos pela CCPS e que são exibidos no ANEXO 2.

Etapa 5: estimativa do risco do cenário combinando matematicamente a consequência, o evento iniciador e os dados das IPLs. Para isso existem fórmulas aritméticas e métodos gráficos que embasam esse processo. Independente do métodos escolhido, existem um formulário-padrão (ANEXO 3) para registro de todas os resultados do estudo LOPA. O cálculo genérico é exibido na Equação 1 e nela a frequência do evento iniciador, determinado na Etapa 3, é multiplicada pelo produto das PFDs da IPL, determinadas na Etapa 4.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^I PFD_{ij} \quad \text{Equação 1}$$

O termo f_i^C representa a frequência para a consequência C do evento iniciador i, o termo f_i^I representa a frequência do evento iniciador i e PFD_{ij} é a probabilidade de falha sob demanda da IPL j que protege contra a consequência C do evento iniciador i. O resultado da Equação 1 pode ser usado para comparar o risco calculado com os critérios de tolerância ao risco do cenário para os métodos de tomada de decisão que serão exigidos ao final da LOPA.

Etapa 6: avaliação do risco para tomada de decisão sobre o cenário. De acordo com o CCPS, os 2 tipos básicos mais recomendados para avaliação de risco são: comparação do risco calculado com um critério predeterminado de tolerância ao risco e a comparação relativa entre alternativas concorrentes para redução de risco. A partir dessas análises, serão definidas as necessidades e próximos passos a serem seguidos para neutralização do evento iniciados do cenário analisado.

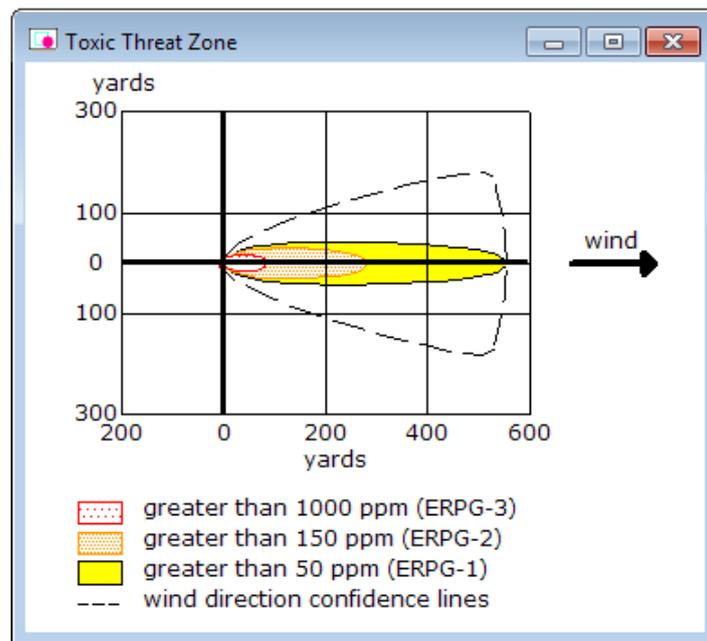
3.4. Modelagem de cenário através do Software ALOHA

O software ALOHA (*Areal Locations of Hazard Atmospheres* que traduzindo para o português significa Locais de Áreas de Atmosferas Perigosas) é um software de domínio público editado pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), departamento do governo estadunidense responsável pelos assuntos relacionados à atmosfera e oceanos.

A finalidade principal do ALOHA é estimar a extensão espacial de alguns perigos comuns associados a vazamentos de produtos químicos. De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos EUA (EPA), o software permite que sejam inseridos detalhes de uma liberação química real ou potencial e, em seguida, ele gerará estimativas da zona ameaçada para vários tipos de perigos. É possível modelar nuvens de gases tóxicos, gases inflamáveis, incêndios e explosões.

A Figura 16 mostra uma das interfaces geradas pelo ALOHA a partir da determinação de uma localidade para o cenário. No caso, a zona de ameaça vermelha indica o pior nível de perigos e as zonas de ameaça laranja e amarela representam que o perigo está decrescendo de forma inversamente proporcional à distância do ocorrido.

Figura 16 – Interface genérica do Software ALOHA



Fonte: EPA, 2021.

4. ESTUDO DE CASO

Ao longo deste capítulo as metodologias apresentadas anteriormente serão aplicadas em um estudo de caso para análise das respostas e resultados fornecidos pela identificação de perigos e análise de risco em casos reais.

4.1. Descrição do cenário

A situação a ser analisada ao longo deste capítulo se refere a um caso de acidente real durante o transporte rodoviário de gasolina. De acordo com a notícia veiculada pela Agência Brasil no dia 26 de abril de 2016, um caminhão tanque de 60.000 litros de capacidade estava carregado com Gasolina A e em deslocamento pela Rodovia Ayrton Senna, quando no km 35 dessa rodovia, na cidade de Itaquaquecetuba – SP próximo ao trevo de acesso ao Rodoanel Mário Covas, perdeu o controle e tombou no canteiro central da pista.

O acidente aconteceu por volta das 07h00 e ocasionou o vazamento da gasolina seguida de uma explosão e posterior incêndio. A equipe do corpo de bombeiros foi acionada e por volta das 8h30 do mesmo dia conseguiu combater o incêndio. O motorista do veículo foi encaminhado a um hospital próximo em estado grave, pois mesmo tendo conseguido abandonar o veículo sofreu várias e graves queimaduras.

De acordo com dados históricos fornecidos pelo INMETRO, as medições da estação mais próxima do local (Estação São Paulo – Mirante) naquele dia indicavam que a temperatura no horário do acidente era de cerca de 24°C, a umidade do ar estava em 52% e a velocidade média do vento era de 0,5 m/s com direção leste, ou seja, o vento vinha do leste em direção a oeste.

As Figuras 17 e 18 trazem registros de como estava o cenário do acidente durante o incêndio e após o fogo ter sido controlado pelos bombeiros, respectivamente.

Figura 17 – Incêndio causado pelo tombamento de um caminhão-tanque carregado de gasolina A



Foto: TV Globo. Disponível em Veja Online.

Figura 18 – Cenário após controle de incêndio causado pelo tombamento de um caminhão-tanque pelo corpo de bombeiros



Fonte: Florio E./Futura Press. Disponível em Terra Online.

Para fins de estudo nesse trabalho, segue na Figura 19 a definição da unidade de estudo do processo que será analisado pelas metodologias de Identificação de Perigos e Análise de Riscos nos tópicos que se seguem. O fluxograma mostra a unidade de estudo em questão, que é o processo simplificado de transporte de combustíveis líquidos, no caso a gasolina, pelo modal rodoviário no Brasil incluindo a carga na origem, o trânsito rodoviário e a descarga no destino. Estão identificados na Figura 20 os “nós” que serão utilizados mais adiante para o estudo HAZOP.

Figura 19 – Fluxograma do processo simplificado de transporte de combustíveis líquidos



Fonte: autoria própria.

4.2. Identificação de Perigos

Para a etapa inicial de identificação de perigos, dentre os métodos apresentados anteriormente, utilizou-se o estudo HAZOP. Esse foi o método escolhido por trazer como resultado uma análise mais completa e que já engloba os resultados gerados pelos outros dois métodos mencionados, *Checklist* e *What-If*, no momento de determinação dos parâmetros de análise e palavras-guia. Além disso, a análise HAZOP é a etapa inicial para a Análise de Camadas de Proteção, que será a metodologia utilizada na análise de riscos mais adiante.

4.2.1. Adaptação do estudo HAZOP ao caso

Com base no estudo de Quintella (2011) sobre a adaptação da metodologia HAZOP para a Identificação de Riscos na área da saúde, serão utilizados neste trabalho alguns parâmetros adaptados do HAZOP tradicional, visto que a metodologia original tem conceitos totalmente voltados para processos industriais.

A adaptação se faz necessária, pois a etapa de trânsito do produto, que é a de maior duração no processo descrito pela Figura 20, envolve riscos externos e associados a falhas humanas que não são contemplados pelos parâmetros utilizados no HAZOP tradicional.

Assim, foram adicionados 3 novos parâmetros adaptados para a análise: Ergonomia, Atenção e Dirigibilidade. Os dois primeiros são sugeridos por Quintella (2011) para contemplarem a análise da falha humana e o último sugerido neste trabalho para contemplar a identificação da influência das condições climáticas, estruturais e mecânicas na dirigibilidade do veículo ao longo do trânsito rodoviário até seu destino.

A inclusão dos 3 parâmetros citados acima, juntamente com os parâmetros tradicionais do estudo HAZOP, permitem que as combinações de palavras chave e parâmetros englobem os desvios de forma mais direcionada a área de estudo que no caso é a logística rodoviária de combustíveis.

Tradicionalmente, o estudo HAZOP exige uma equipe, composta por diversos profissionais envolvidos no processo, para a realização do estudo. Neste trabalho, o estudo foi realizado apenas pela autora devido ao tempo hábil disponível para realização do mesmo, porém, é fortemente recomendado que o estudo seja revalidado com uma equipe devidamente formada.

4.2.2. Aplicação do HAZOP

O estudo HAZOP foi realizado de acordo com o procedimento detalhado no item 3.1 deste trabalho e considerando as adaptações citadas e justificadas no tópico anterior.

Considerou-se como objeto de estudo o fluxograma exibido na Figura 20 e dentro dele foram selecionados 3 “nós”. O primeiro deles na operação de carregamento do caminhão-tanque, o segundo no trânsito rodoviário do caminhão carregado entre origem e destino e o terceiro no processo de descarga do caminhão no seu destino.

Para complementar o estudo HAZOP, utilizou-se uma ferramenta, já detalhada anteriormente do tópico 3.2 deste trabalho, chamada Matriz de Risco. O processo de introdução da Matriz dentro da HAZOP é detalhado a seguir:

4.2.2.1. Aplicação da Matriz de Risco

De acordo com o procedimento detalhado no tópico 3.2, a matriz de risco foi construída classificando os cenários obtidos no estudo HAZOP de acordo com frequência (F), severidade (F) e nível de riscos (R). As últimas colunas das Tabelas 9, 10 e 11 já incluem a classificação dos cenários quanto a esses critérios.

A classificação foi feita de acordo com os critérios definidos por Pinheiro e Martins (2020). As Tabelas 9 e 10 trazem os critérios adotados para cada uma das classificações.

Tabela 9 – Classificação quanto ao nível de frequência

Peso	Classificação	Descrição
1	Raro	Teoricamente é possível, mas é muito improvável que ocorra ao longo da realização da atividade.
2	Improvável	Há pouca probabilidade de ocorrer durante a atividade. É um evento controlado, com existência de meios de proteção.
3	Provável	É esperado que ocorra no máximo até uma vez ao longo da atividade. Nesse caso, as medidas de controle e proteção precisam de aprimoramento.
4	Frequente	É esperado que ocorra mais de uma vez ao longo da atividade. Há registros de casos frequentemente.

Fonte: Adaptado de PINHEIRO e MARTINS (2020).

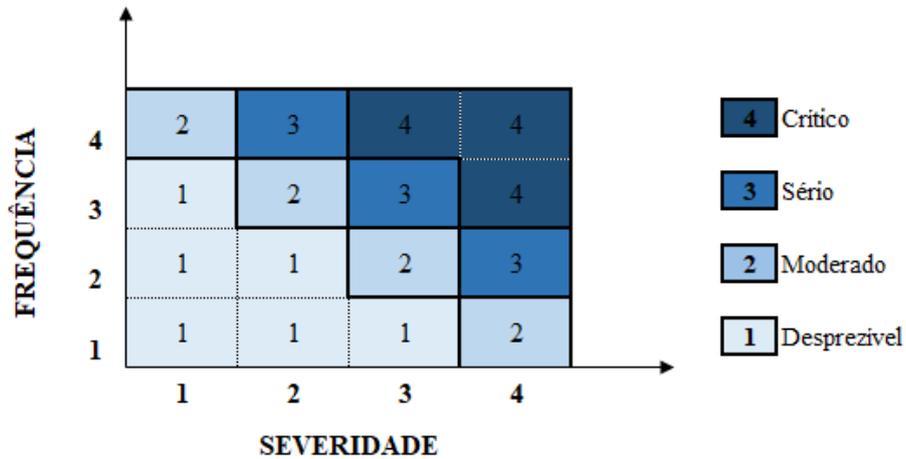
Tabela 10 – Classificação quanto ao nível de severidade

Peso	Classificação	Descrição
1	Desprezível	Danos mínimos ou sem danos. Sem ocorrência de lesões/mortes. O máximo tolerado são casos de primeiros socorros.
2	Marginal	Danos leves: lesões leves e danos materiais controláveis ou de baixo custo para reparo.
3	Crítica	Danos severos à propriedade, meio ambiente e/ou equipamentos. Lesões moderadas com probabilidade baixa de morte.
4	Desastrosa	Danos irreparáveis, de reparação lenta ou improvável. Lesões graves e alta probabilidade de morte.

Fonte: Adaptado de PINHEIRO e MARTINS (2020).

A partir dessas classificações foi possível desenvolver a Matriz de Riscos para o estudo de caso, exibida na Figura 20, a fim de se estabelecer o nível de risco para cada consequência analisada. A Figura 20 deixa claro como a combinação entre as classificações quanto a frequência e quanto a severidade resulta em um nível de risco para o cenário.

Figura 20 – Matriz de Risco



Fonte: Adaptado de PINHEIRO e MARTINS (2020).

Os resultados para o estudo HAZOP em cada um dos “nós” 1, 2 e 3 são exibidos nas Tabelas 11, 12 e 13, respectivamente. Nas últimas colunas das Tabelas aparecem as classificações da Matriz de Risco quanto à Frequência (F), Severidade (S) e a classificação final do risco (R).

Tabela 11 – Estudo HAZOP para “nó” 1

Ponto de Estudo:		Nó 1							
Atividade:		Carregamento do caminhão tanque					Classificação		
Parâmetro	Palavra-guia	Desvio	Causas	Consequência	Ação Requerida	F	S	R	
Fluxo	Mais	Mais fluxo	1. Falha humana na operação	Vazamento de produto inflamável para o ambiente externo;	1. Sistema de fechamento automático de válvula	2	4	3	
			2. Falha na válvula de controle de entrada de produto no tanque do caminhão	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	2. Sistema de alarme para nível do tanque				
			3. Falha no controle de vazão	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	3. Treinamento dos operadores 4. Sistema de contingência				
Nível	Menos	Diminuição do nível do tanque do caminhão	1. Vazamento no tanque por fissura na estrutura	Vazamento de produto inflamável para o ambiente externo;	1. Sistema de alarme para falha na válvula	3	4	4	
			2. Vazamento no tanque por falha na válvula	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	2. Programação regular de manutenção				
			3. Falha humana na operação	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	3. Vigilância em campo pelo operador				
Atenção	Não	Nenhuma atenção	1. Distração	Colisões acidentais;	1. Treinamento dos operadores e motoristas	4	4	4	
			2. Acúmulo de trabalho/funções	Atropelamento;	2. Controle de jornada				
			3. Problemas pessoais	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	3. Fiscalização constante durante a operação				
			4. Excesso de confiança	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	4. Revisão de rotina constante				

Fonte: autoria própria.

Tabela 12 – Estudo HAZOP para “nó” 2

Ponto de Estudo:		Nó 2							
Atividade:		Trânsito entre origem e destino					Classificação		
Parâmetro	Palavra-guia	Desvio	Causas	Consequência	Ação Requerida	F	S	R	
Temperatura	Mais	Temperatura elevada	1. Falha no sistema de isolamento do tanque	Elevação da pressão interna do tanque; Risco de explosão.	1. Programação regular de manutenção	2	4	3	
Temperatura	Menos	Temperatura baixa	1. Falha no sistema de isolamento do tanque	Alteração nas propriedades físicas do produto (ex: viscosidade); Entupimento de válvulas; Problemas na descarga.	1. Programação regular de manutenção	2	2	1	
Nível	Menos	Diminuição do nível do tanque	1. Vazamento no tanque por fissura na estrutura 2. Vazamento no tanque por falha na válvula 3. Colisão/Acidente no trânsito com danos à estrutura	Vazamento de produto inflamável para o ambiente externo; Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas; Danos à rodovia; Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	1. Programação regular de manutenção 2. Elaboração de rotograma prévio ao início da viagem 3. Treinamento dos motoristas	2	4	3	
Dirigibilidade	Menos	Baixa dirigibilidade	1. Rodovias precárias e esburacadas 2. Condições climáticas desfavoráveis (chuva, vento, neblina, etc.) 3. Problemas mecânicos no caminhão 4. Animais na pista	Colisões e acidentes rodoviários; Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas; Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	1. Treinamento dos motoristas 2. Elaboração de rotograma prévio ao início da viagem 3. Programação regular de manutenção	4	4	4	

Parâmetro	Palavra-guia	Desvio	Causas	Consequência	Ação Requerida	Classificação		
						F	S	R
Dirigibilidade	Não	Nenhuma dirigibilidade	1. Alagamentos	Colisões e acidentes rodoviários;	1. Programação regular de manutenção	3	4	4
			2. Tempestades	Risco evidente de incêndio e/ou explosão	2. Treinamento dos condutores			
			3. Problemas mecânicos críticos (ex.: pane nos freios)	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	3. Elaboração de rotograma prévio ao início da viagem 4. Mapeamento de pontos de apoio no trajeto			
Ergonomia	Menos	Pouca ergonomia	1. Jornadas de trabalho muito longas	Sono ao volante;	1. Controle de jornada	3	4	4
			2. Caminhões não adequados para longas viagens	Colisões e acidentes rodoviários;	2. Disponibilização de EPIs e EPCs em todos os veículos			
			3. Falta de equipamentos de segurança adequados (EPIs e EPCs)	Falta de equipamentos de proteção adequada em caso de acidente.	3. Checklist de itens de ergonomia antes do início da viagem			
Atenção	Não	Nenhuma atenção	1. Distração	Colisões e acidentes rodoviários;	1. Controle de jornada	4	4	4
			2. Acúmulo de trabalho/funções	Atropelamento;	2. Controle de velocidade			
			3. Problemas pessoais	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	3. Sensor de fadiga			
			4. Excesso de confiança	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	4. Mapeamento de pontos de apoio no trajeto			
			5. Jornadas de trabalho muito longas	Sono ao volante.				

Fonte: autoria própria.

Tabela 13 – Estudo HAZOP para “nó” 3

Ponto de Estudo:		Nó 3							
Atividade:		Descarga do caminhão tanque					Classificação		
Parâmetro	Palavra-guia	Desvio	Causas	Consequência	Ação Requerida	F	S	R	
Fluxo	Mais	Mais fluxo	1. Falha humana na operação	Vazamento de produto inflamável para o ambiente externo;	1. Sistema de fechamento automático de válvula	2	4	3	
			2. Falha na válvula de controle de entrada de produto no tanque do caminhão	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	2. Sistema de alarme para nível do tanque				
			3. Falha no controle de vazão	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	3. Treinamento dos operadores 4. Sistema de contingência				
Nível	Reverso	Tanque do caminhão não ficar vazio	1. Falha da bomba de descarga	Caminhão seguirá com resíduo para a próxima viagem;	1. Treinamento dos operadores	2	2	1	
			2. Falha humana na operação	Contaminação da próxima carga podendo deixá-la fora de especificação.	2. Programação regular de manutenção 3. Vigilância em campo pelo operador				
Atenção	Não	Nenhuma atenção	1. Distração	Colisões acidentais;	1. Treinamento dos operadores e motoristas	4	4	4	
			2. Acúmulo de trabalho/funções	Atropelamento;	2. Controle de jornada				
			3. Problemas pessoais	Derrame de produto possibilitando contaminação do solo/águas;	3. Fiscalização constante durante a operação				
			4. Excesso de confiança	Risco evidente de incêndio e/ou explosão.	4. Revisão de rotina constante				

Fonte: autoria própria.

4.3. Análise de Riscos

Para a etapa de análise de riscos, a metodologia aplicada foi a LOPA. Essa foi a metodologia escolhida, pois dentre as estudadas ao longo do trabalho foi a que se mostrou mais completa e também, complementa a análise HAZOP, já utilizada na identificação de perigos. Dessa forma, a união dos resultados das duas metodologias neste estudo de caso permite um resultado mais abrangente e fornece mais informações para embasarem a tomada de decisão na implementação de um possível procedimento de segurança no processo.

4.3.1. Aplicação da LOPA

O estudo LOPA foi realizado de acordo com procedimento detalhado no tópico 3.3. e o resultado final da aplicação ao estudo de caso é exibido na ficha de registro do modelo, apresentada na Tabela 14.

Para a aplicação da metodologia foi necessário selecionar um dos cenários identificados no estudo HAZOP mostrado anteriormente, pois o LOPA só analisa uma situação por vez. Dessa forma, selecionou-se o cenário de “Nenhuma atenção” identificado no “nó 2” do fluxograma analisado no HAZOP. Esse cenário foi escolhido, pois é o que culmina no acidente visto no estudo de caso.

Uma etapa adicional foi adicionada ao procedimento previamente descrito nesse trabalho, devido à necessidade de se considerar as condições modificadoras no cenário, que são situações que podem impactar na consequência final do cenário. No caso, as condições modificadoras consideradas foram: probabilidade de ignição do produto inflamável derramado; probabilidade de pessoas na área afetada; e a probabilidade de lesão fatal.

Dessa forma, o cálculo para a frequência de consequência sofre uma pequena alteração e é exibido na Equação 2.

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^I PFD_{ij} \times \prod_{j=1}^I P mod_{ij} \quad \text{Equação 2}$$

Os termos f_i^C e PFD_{ij} já foram apresentados anteriormente e o termo $P mod$ representa a probabilidade das condições modificadoras. Considerou-se também que para este estudo o critério de tolerância para acidentes rodoviários é zero devido ao alto potencial de fatalidades envolvido.

Tabela 14 – Ficha de registro do estudo LOPA

Cenário N°: X	Título do Cenário: Derramamento de produto inflamável em rodovia		
N° do Equipamento: X			
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da Consequência/ Categoria	Acidente envolvendo caminhão tanque com derramamento de gasolina em rodovia gerando risco de explosão e contaminação de solo e águas, devido a falha do motorista		
Crítérios de Tolerância ao Risco (Categoria ou Frequência)	Nenhum acidente é tolerado		0
Evento Iniciador (tipicamente uma frequência)	Falha de atenção do operador ao dirigir o caminhão-tanque carregado com produto inflamável (gasolina A)		1×10^{-1}
Condição ou Evento Habilitador	-	-	
Condições modificadoras (se aplicáveis)			
	Probabilidade de ignição	1×10^{-1}	
	Probabilidade de pessoas na área afetada	1×10^{-1}	
	Probabilidade de lesão fatal	5×10^{-1}	
Frequência de Consequência sem Mitigação			5×10^{-4}
Camadas de Proteção Independente			
	Alarme sonoro e visual para excesso de velocidade (a ser adicionado - ver "Ações")	1×10^{-1}	
	Sensor de fadiga (a ser adicionado - ver "Ações")	1×10^{-1}	
Salvaguardas (não IPLs)	Treinamento adequado aos motoristas		
	Controle de jornada		
PFD Total para todas as IPLs		1×10^{-2}	
Frequência das Consequências Mitigadas			5×10^{-6}
Crítérios de Tolerância ao Risco Atendidos? (Sim/Não)	Não, nem com a adição de SIFs (Safety Instrumented Function). Isso porque a tolerância ao risco é nula.		
Ações Necessárias para atender aos critérios de tolerância ao risco	Para tentar diminuir a probabilidade de consequências é necessário a adição de dois sensores para auxiliar na atenção do motorista durante a sua jornada: excesso velocidade e fadiga.		
Notas:	-		

Fonte: autoria própria.

4.3.2. Aplicação do Software ALOHA para modelagem de cenário

Para aplicação no software ALOHA foi necessário o cadastro do produto químico envolvido no acidente, dados atmosféricos e alguns detalhes específicos sobre o acidente para estudo da força da explosão. Seguem abaixo os dados que foram imputados no software:

Produto Químico:

De acordo com Magnanelli (2012), a gasolina é uma mistura complexa de componentes, porém, o software contempla apenas substâncias puras e algumas misturas, mas a gasolina não é uma delas. Portanto, para fins de estudo, a substância cadastrada no software para análise do potencial do acidente foi o benzeno, hidrocarboneto aromático que é um dos mais relevantes na composição geral da gasolina (MAGNANELLI, 2012).

Dados Atmosféricos:

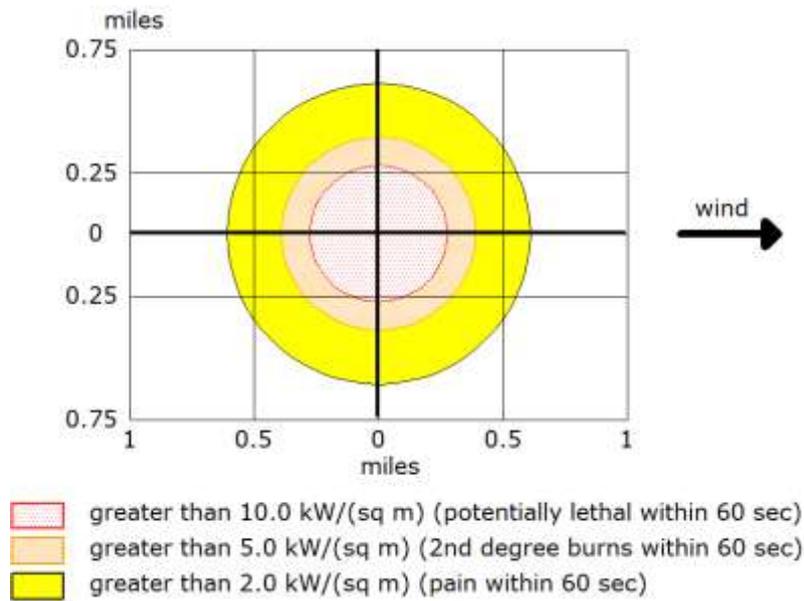
Com base nos dados do INMETRO, já apresentados na descrição desse estudo de caso, considerou-se: vento leste com velocidade de 0,5 m/s; local urbano; céu parcialmente nublado; temperatura ambiente de 24°C; e umidade relativa em 52%.

Dados do Acidente:

O produto estava sendo transportado em estado líquido em um tanque de capacidade total de 60.000 litros, que de acordo com a fornecedora METALESP tem em média 2,4 m de diâmetro e 13,3 m de comprimento. Foi considerado um cenário de BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion*, termo utilizado para se referir a um tipo de explosão onde um recipiente contendo líquido se rompe durante um incêndio) de um produto inflamável armazenado em um tanque horizontal cilíndrico.

Com base nessas informações, gerou-se pelo software a simulação do potencial de alcance da explosão do caminhão-tanque. A Figura 21 traz a interface gerada no software contendo a zona de ameaça pelo raio de alcance da explosão e os riscos existentes de acordo com a distância do local do acidente.

Figura 21 – Zona de ameaça



Fonte: software ALOHA.

A visualização mostra a potência da explosão em três faixas diferentes determinadas de acordo com a distância do ponto central da explosão. O círculo amarelo é o mais distante, e receberá uma potência de 2 kW/m² e trazendo apenas a consequência de dor, em caso de exposição humana ao calor gerado, durante 60 segundos a partir do acontecido. O círculo alaranjado, intermediário, recebe uma potência de 5 kW/m² e as consequências são queimaduras de segundo grau. Já o círculo interno, indicado com pontilhado vermelho, recebe a potência de 10 kW/m² e as consequências podem ser fatais durante um período também de 60 segundos. Além disso, de acordo com o ALOHA, a nuvem de explosão teria duração de 14 segundos e um alcance total de aproximadamente 215 metros.

O software também permite que a simulação do cenário de acidente seja inserida diretamente no software de mapas Google Earth. Permitindo, assim, que as áreas de ameaça identificadas ao longo da modelagem sejam vistas aplicadas em um mapa a partir da latitude e longitude do local do acidente. Assim, pode-se perceber com mais clareza quais serão as estruturas e áreas exatas a serem afetadas em caso de acidente.

A Figura 22 traz a aplicação da Figura 21 no local do tombamento do caminhão tanque do estudo de caso analisado.

Figura 22 – Aplicação das Zonas de Ameaça no Google Earth

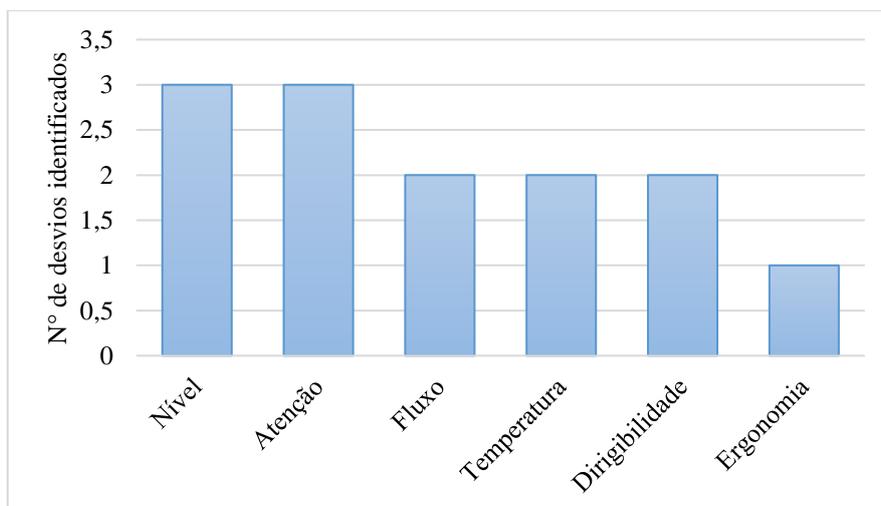


Fonte: Software ALOHA e Google Earth.

4.4. Discussão dos Resultados

Através da combinação dos resultados obtidos no estudo HAZOP é possível organizar as consequências identificadas de acordo com os parâmetros identificados para cada uma delas. A Figura 23 traz um gráfico com o número de vezes que cada parâmetro se repetiu nos cenários de desvios identificados.

Figura 23 – Recorrência de parâmetros na análise HAZOP



Fonte: autoria própria.

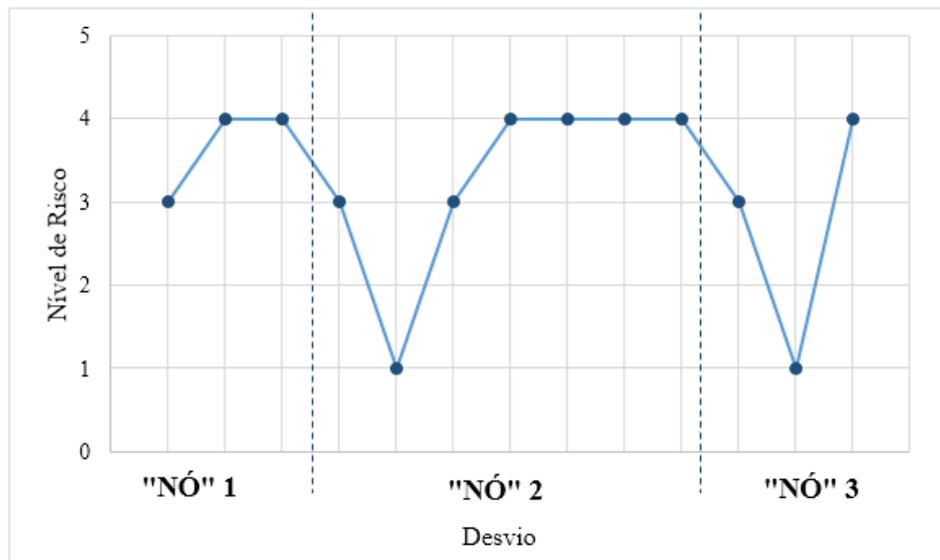
A visão gerada pelo gráfico da Figura 24 auxilia os gestores do processo analisado a identificarem quais são os parâmetros mais suscetíveis a desvios ao longo da atividade em questão e dessa forma, podem direcionar os esforços iniciais no desenvolvimento de procedimentos de segurança de forma mais assertiva. Porém, não necessariamente os parâmetros mais suscetíveis a erros são os que geram os maiores níveis de risco para o processo, para isso, a combinação da análise HAZOP com a Matriz de Risco é fundamental.

Pela Figura 23, temos que os parâmetros com mais suscetibilidade de erro são: nível e atenção. Dentro das consequências identificadas para o parâmetro “nível”, temos uma de nível de risco 4, uma 3 e uma de nível 1. Já para o parâmetro “atenção” os riscos associados são maiores. Temos as três consequências identificadas com nível de risco 4. Assim, mesmo o parâmetro “nível” tendo o mesmo número de consequências identificadas que o parâmetro “atenção”, fica claro que os desvios relacionados a “atenção” precisam de ações mais imediatas devido ao alto risco que geram para a sociedade, meio ambiente, funcionários e instalações.

Além disso, o evento ocasionador do acidente analisado foi identificado no HAZOP e é um desvio identificado para o parâmetro “atenção”. Na Tabela 11, o desvio “nenhuma atenção” é o que não pôde ser evitado no caso estudado e resultou na explosão seguida de incêndio devido a uma falha humana por falta de atenção na direção.

Para contribuir na análise de nível de risco, a Figura 24 traz uma distribuição dos desvios identificados na análise HAZOP de acordo com o seu respectivo nível de risco e também, de acordo com o seu “nó”. Dessa forma, pode-se identificar qual é o “nó” do objeto de estudo que precisa de mais atenção com procedimentos de segurança. No caso estudado, o “nó” 2 é o que tem mais desvios identificados e também, mais ocorrências de nível de risco 4, portanto, é o que precisa de procedimentos de segurança imediatos.

Figura 24 – Distribuição dos desvios identificados de acordo com nível de risco e “nó”



Fonte: autoria própria.

O estudo LOPA permite que os gestores do processo analisado avaliem a frequência das consequências analisadas e comparem esse valor, com o nível de tolerância definido previamente para o processo. No caso estudado, o nível de tolerância estabelecido foi zero, visto que um derramamento de produto inflamável seguido de explosão e incêndio traz severos riscos a sociedade, como mostrado na análise HAZOP e Matriz de Risco, incluindo fatalidades e portanto, não deve ser tolerado. Assim, não há como existir IPLs suficientes no processo que zerem a frequência da consequência, porém, o objetivo é que a frequência se torne a menor possível.

No estudo a frequência inicial da consequência era de 5×10^{-4} , o que significa em termos práticos que a cada 2.000 situações como a analisada no estudo de caso, 1 delas culminaria em um acidente. Com a sugestão de adição de duas novas IPLs no cenário: alarmes excesso de velocidade e sensor de fadiga, a frequência da consequência foi reduzida para 5×10^{-6} , ou seja, nessa nova situação precisa-se de 200.000 situações como a analisada para termos 1 delas terminando em acidente.

Ambas as IPLs citadas como sugestão de implementação no relatório LOPA, são SIFs (*Safety Instrumented Function*, traduzindo para o português “funções instrumentadas de segurança”) que são basicamente instrumentos que podem ser adicionados ao processo e tem como objetivo aumentar a segurança do mesmo. Por serem SIFs de mesma categoria, sensores, tem a mesma probabilidade: 1×10^{-1} (CCPS, 2021).

Dessa forma, a análise LOPA traz a informação quantitativa relacionada à frequência de ocorrência de determinada consequência analisada, tanto do processo original quanto do processo modificado. Essa informação embasa com valores a real eficiência de implementação de uma nova IPL e se ela será capaz de enquadrar o desvio dentro dos critérios pré estabelecidos de tolerância do processo.

Por fim, a aplicação no software ALOHA mostra o potencial de alcance das consequências analisadas. No caso, foi possível analisar o raio de alcance da explosão e as consequências geradas em diferentes distâncias do ponto central da explosão. A análise do software não traz necessariamente o que acontece na realidade, pois como já mencionado, algumas adaptações de cenário foram feitas e existem fatores que não são considerados, como por exemplo o tempo de reação do corpo de bombeiros, possíveis potencializadores do incêndio que possam estar próximos do acidente, etc. Mas, de qualquer maneira, o software é uma excelente ferramenta para antecipação de cenários.

No caso estudado, o software ALOHA poderia ser aplicado previamente à viagem simulando cenários de acidentes ao longo da rota que o caminhão-tanque necessita seguir. Assim, poderiam ser identificados os pontos do trajeto mais arriscados e com maiores consequências em caso de acidente para direcionar medidas específicas de segurança para esses pontos. O software é mais uma ferramenta disponível para embasar o direcionamento e priorização das medidas de segurança em uma instalação ou atividade, ainda mais quando combina-se seus resultados com as funcionalidades do Google Earth.

5. CONCLUSÃO

Após a aplicação das metodologias HAZOP, Matriz de Risco e LOPA no estudo de caso escolhido, pode-se concluir que a situação do acidente seria mapeada e identificada se fossem aplicadas as metodologias indicadas no trabalho. Não é possível garantir que o acidente seria evitado, pois as metodologias trabalhadas neste relatório não estabelecem novos procedimentos de segurança ou implementam qualquer mudança ao processo. Elas têm a função de guiar as instalações e empresas no caminho de um processo mais seguro mostrando onde estão os principais gargalos e origens de desvios nas atividades analisadas.

A análise HAZOP foi capaz de determinar 13 cenários de risco para a situação analisada com um grau de detalhamento que permite a tomada de diversas ações a partir

das causas e consequências determinadas no estudo. A Matriz de Risco, utilizada em conjunto com o HAZOP, traz a priorização dos cenários identificados, visto que em um cenário real de análise é fundamental que as propostas de segurança e melhorias para o processo sejam priorizadas, visto que na maioria das vezes as mudanças precisam ser feitas gradualmente.

A análise LOPA trouxe uma visão quantitativa para o cenário. Foi possível concluir que dentro da metodologia a sugestão de inserção de novas IPLs no cenário traz resultados muito positivos à probabilidade de consequência final do estudo. No caso, a redução foi de 100 vezes.

Por fim, a aplicação do software ALOHA é eficiente para a modelagem de cenários e para entendimento do real potencial de impacto dos acidentes possíveis dentro dos cenários analisados, porém, não tem eficiência da identificação e prevenção de riscos.

Portanto, a partir do estudo de caso, pode-se afirmar que as metodologias utilizadas são eficazes na identificação e análise dos riscos para o transporte rodoviário de combustíveis e geram insumos suficientes para embasar a implementação de novos procedimentos de segurança na atividade, visto que os desvios do processo foram identificados no HAZOP, qualificados quanto ao nível de risco na Matriz de Risco e quantificados pelo estudo LOPA em relação a frequência de suas consequências.

Como sugestões de continuidade para esse trabalho, tem-se:

- Implementação de novos procedimentos de segurança no transporte rodoviário de combustíveis no Brasil a partir da identificação e análise exibida neste trabalho;
- Realização de um novo estudo HAZOP com uma equipe adequada composta por funcionários e players da área como motoristas, representantes de transportadoras, representantes de distribuidoras e terminais de distribuição.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES (ANTT). Constituição (2021). Resolução Nº 5.947. Brasília, 02 jun. 2021. n. 103, Seção 1, p. 1-74.

ALMEIDA, Luciano de Mattos. Proposta de melhoria no transporte rodoviário de produtos perigosos. 2020. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Cesumar, Maringá, PR, 2020.

ALOHA Software. Version 5.4.7, Sept 2016, 7.33 MB EXE. Disponível em: <https://www.epa.gov/cameo/aloha-software>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2021. Rio de Janeiro: Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2021>. Acesso em: 20 mar. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Constituição (2003). ABNT NBR 14619: Transporte terrestre de produtos perigosos - Incompatibilidade química. Rio de Janeiro, RJ, 31 mar. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Constituição (2017). ABNT NBR 7500: Identificação para o transporte terrestre, manuseio, movimentação e armazenamento de produtos. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ, 26 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Constituição (2020). ABNT NBR 9735: Conjunto de equipamentos para emergências no transporte terrestre de produtos perigosos. 10. ed. Rio de Janeiro, RJ, 16 mar. 2020.

BARROS, Sergio Silveira de. Análise de Riscos. Curitiba: Instituto Federal do Paraná - Educação A Distância, 2013.

CASTRO, Roberto Portela de. Apostila de Gerenciamento de Risco. São Paulo: Universidade Paulista UNIP, 2015.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Relatório de Atendimento: emergências químicas. Emergências Químicas. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/apresentacao/relatorios-de-atendimento/>. Acesso em: 15 mar. 2022.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Oxidantes e peróxidos orgânicos. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/aspectos-gerais/perigos-associados-as-substancias-quimicas/oxidantes-e-perioxido-organicos/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA (CBIE). Como é feita a distribuição de combustíveis no Brasil? 2020. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/como-e-feita-a-distribuicao-de-combustiveis-no-brasil/>. Acesso em: 06 mar. 2022.

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). Resolução N°211/06: Requisitos necessários à circulação de Combinações de Veículos de Carga. Brasília, DF, 13 nov. 2006.

CRAWLEY, Frank; TYLER, Brian. HAZOP: Guide to best practice. Elsevier, 2015.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph F. Chemical Process Safety: fundamentals with applications. 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall Ptr, 2002.

DE CICCO, Francesco; FANTAZZINI, Mario Luiz. A identificação e análise de riscos. Revista Proteção-Suplemento especial, n. 2, 1994.

DE PAULO, Wanderlei de Lima et al. Riscos e controles internos: uma metodologia de mensuração dos níveis de controle de riscos empresariais. Revista Contabilidade & Finanças, v. 18, n. 43, p. 49-60, 2007. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rcf/article/view/34214/36946>. Acesso em: 02 mar. 2022.

CENTRO PARA SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS (CCPS). Análise de Camada de Proteção: Avaliação simplificada do risco de processo. Rio de Janeiro: Interciência, 2021. Traduzido pela Petrobras.

CENTRO PARA SEGURANÇA DE PROCESSOS QUÍMICOS (CCPS). Instituto Americano de Engenheiros Químicos. Diretrizes Para Segurança De Processos Baseada Em Risco. Rio de Janeiro: Interciência, 2014. Traduzido pela Petrobras.

FONSECA, Nuno Nascimento Ciravegna da. Aplicação do Método HAZOP em operações da CEPSA Portuguesa Petróleos S.A. 2016. 97 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Segurança e Higiene Ocupacionais, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2016.

GOOGLE EARTH: mapa mundi em 3D. Versão 9.159.0.0 – WebAssembly with threads
Disponível em: <<https://www.google.com.br/intl/pt-PT/earth/>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

INAFLEX. Conheça as principais legislações sobre caminhão tanque. 2021. Disponível em: <https://inaflex.com.br/conheca-as-principais-legislacoes-sobre-caminhao-tanque/>. Acesso em: 12 mar. 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS E RENOVÁVEIS (IBAMA). Constituição (2012). Instrução Normativa 5, de 09 de Maio de 2012. Brasília, DF, 10 maio 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS E RENOVÁVEIS (IBAMA). Cadastro Técnico Federal (Ctf). Brasília, DF, 16 fev. 2017. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/cadastro-tecnico-federal-ctf>. Acesso em: 10 mar. 2022.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA (INMETRO). Dados Históricos Anuais. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 20 mar. 2022.

LIEGGIO JÚNIOR, Marne. Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos: Proposta de metodologia para escolha de empresas de transporte com enfoque em gerenciamento de riscos. 2008. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

LUBRIFIC. Placa Numerologia 33 1170 Etanol (Alcool) 40x30 cm PLASTCOR. Disponível em: <https://www.lubrific.com.br/placa-numerologia-33-1170-etanol-alcool-40x30cm-plastcor.html>. Acesso em: 08 mar. 2022.

MAGNANELLI, Nelí Pires. Composição da gasolina: vigilância sanitária em postos de combustíveis. São José dos Campos: Secretaria da Saúde de São Paulo, 2012.

METALESP. Semirreboque Silo Basculante Alumínio 50m³ A 65m³ | Eixos Distanciados. Disponível em: <http://www.metalesp.com.br/pt/silo/semirreboque-silo-basculante-aluminio-50m-sup3-a-65m-sup3-eixos-distanciados>. Acesso em: 15 mar. 2022.

MOREIRA, Marli. Incêndio em acidente na Rodovia Ayrton Senna é controlado. 2016. Agência Brasil. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2016->

04/incendio-em-acidente-na-rodovia-ayrton-senna-e-controlado. Acesso em: 16 mar. 2022.

PINHEIRO, Dilaelson Ferreira; MARTINS, Harley dos Santos. Aplicação da técnica HazOp como ferramenta de gestão de riscos em uma distribuidora de bebidas. *Research, Society And Development*, [S.L.], v. 9, n. 11, p. 1-38, 17 nov. 2020. *Research, Society and Development*.

QUINTELLA, Mônica Caldeira. Adaptação e Aplicação da Técnica HAZOP na Identificação de Risco na Área de Serviço de Saúde: Estudo de Caso HEMOCENTRO/UNICAMP. 2011. 114 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Área de Concentração: Engenharia de Processos, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2011.

RAMOS, Fernando Batista. Metodologia para escolha de alternativas de rotas para o transporte de materiais perigosos. 1997. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Produção, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1997.

SETON. Sinalização e Identificação. Disponível em: <https://www.seton.com.br/placas-e-etiquetas.html>. Acesso em: 10 mar. 2022.

TERRA ONLINE. Incêndio em acidente na Rodovia Ayrton Senna é controlado. 2016. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/brasil/cidades/caminhao-tanque-tomba-e-provoca-incendio-em-sao-paulo,d8d64ddfd6b59effa2d9a45e89687a8effhaf13o.html>. Acesso em: 16 mar. 2022.

UNITED NATIONS (UN). *Transport of Dangerous Goods: model regulation*. 19. ed. New York And Geneva: United Nations, 2015.

VEJA BRASIL ONLINE. Caminhão-tanque tomba e causa incêndio em rodovia de SP. 2016. TV Globo. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/brasil/caminhao-tanque-tomba-e-caoa-incendio-em-rodovia-de-sp/>. Acesso em: 16 mar. 2022.

7. ANEXOS

ANEXO 1 - Frequências de ocorrência de eventos iniciadores

Evento Iniciador	Faixa de Frequência da Literatura (por ano)
Falha Residual do Vaso de Pressão	10^{-5} a 10^{-7}
Falha de Tanque Atmosférico	10^{-3} a 10^{-4}
Intervenção de Terceiros (impacto externo por retroescavadeira, veículo, etc.)	10^{-2} a 10^{-4}
Descarga de Relâmpago	10^{-3} a 10^{-4}
Falha de Água de Resfriamento	1 a 10^2
Incêndio Externo Pequeno (Causas Agregadas)	10^{-1} a 10^{-2}
Incêndio Externo Grande (Causas Agregadas)	10^{-2} a 10^{-4}
Falha do Operador (para executar procedimento rotineiro, assumindo-se bem treinado, sem estresse e sem fadiga)	10^{-1} a 10^{-3} /oportunidade

Fonte: CCPS (2021).

ANEXO 2 – Exemplos de IPLs e PFDs associadas

IPL	Comentários	PFD Associada
Válvulas de Alívio	Previne que o sistema exceda a sobrepressão especificada. A eficácia deste dispositivo é sensível ao serviço e à experiência.	10^{-1} a 10^{-5}
Disco de Ruptura	Previne que o sistema exceda a sobrepressão especificada. A eficácia deste dispositivo pode ser muito sensível ao serviço e à experiência.	10^{-1} a 10^{-5}
Sistema Básico de Controle de Processo (BPCS)	Pode ser creditado como IPL se não estiver associado ao evento iniciador que está sendo considerado.	10^{-1} a 10^{-2}
Funções Instrumentadas de Segurança (SIFs)		
SIF 1	Tipicamente consiste em: - Sensor único - Processador lógico único - Elemento Final Único	$\geq 10^{-1}$ a $< 10^{-2}$
SIF 2	Tipicamente consiste em: - "Múltiplos" sensores - "Múltiplo" processador lógico de canal - "Múltiplos" elementos finais	$\geq 10^{-2}$ a $< 10^{-3}$
SIF 3	Tipicamente consiste em: - Múltiplos sensores - Processadores de lógica de múltiplos canais	$\geq 10^{-3}$ a $< 10^{-4}$

Fonte: CCPS (2021).

ANEXO 3 – Formulário-padrão fornecido pela CCPS para registro dos resultados da LOPA

Cenário N°:	Título do Cenário:		
N° do Equipamento:			
Data:	Descrição	Probabilidade	Frequência (por ano)
Descrição da Consequência/Categoria			
Critérios de Tolerância ao Risco (Categoria ou Frequência)			
Evento Iniciador (tipicamente uma frequência)			
Condição ou Evento Habilitador			
Condições modificadoras (se aplicáveis)			
Frequência de Consequência sem Mitigação			
Camadas de Proteção Independente			
Salvaguardas (não IPLs)			
PFD Total para todas as IPLs			
Frequência das Consequências Mitigadas			
Critérios de Tolerância ao Risco Atendidos? (Sim/Não)			
Ações Necessárias para atender aos critérios de tolerância ao risco			
Notas:			

Fonte: CCPS (2021).