

CENTRO DE TECNOLOGIA DA INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA SENAI: CENTRO DE TECNOLOGIA DA
INDÚSTRIA QUÍMICA E TÊXTIL

Jhéssica Sthephany do Nascimento Inglat

Análise de Risco Social em Trecho de Gasoduto na Região Sudeste do Brasil

Rio de Janeiro

2024

..... QUEBRA DE PÁGINA.....

Jhébica Sthephany do Nascimento Inqlat

Análise de Risco Social em Trecho de Gasoduto na Região Sudeste do Brasil

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Orientador(a): Marta Picardo

Coorientador(a):

Rio de Janeiro

2024

Inglat, Jhéssica do Nascimento.

Análise de risco social m trecho de gasoduto na região sudeste do Brasil /
Jhéssica do Nascimento Inglat. - 2024

45. f. : 30 cm.

Orientadora: Marta Cristina Picardo

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – SENAI
CETIQT, Rio de Janeiro, 2024.

1. Análise de vulnerabilidade. 2. Segurança de Processos. 3. Norma CETESB.

CDD

Jhébica Sthephany do Nascimento Inglat

Análise de Risco Social em Trecho de Gasoduto na Região Sudeste do Brasil

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em engenharia química, da Faculdade de Engenharia Química SENAI CETIQT, como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em engenharia química.

Aprovada em:

Aprovado por:



Orientador: Marta Picardo

Banca Examinadora:



Adriana Alves Barbosa, M. Sc., Senai CETIQT

Assinado eletronicamente

Maximiano Martins, D. Sc., Senai CETIQT, UERJ ZO

Assinado eletronicamente

Frederico do Nascimento Cabral, RME Consultoria e Engenharia

Rio de Janeiro

2024

Dedico este trabalho a todos que, com amor e fé, foram a base e o impulso para que eu
pudesse alcançar este sonho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, por conceder a força e a saúde que me acompanhou até aqui. As adversidades são algumas tantas, mas como bem disse Guimarães Rosa, "viver é um rasgar-se e remendar-se". E assim fui: me refazendo a cada desafio, equilibrando o turbilhão de trabalho, vida acadêmica e pessoal, garantindo que em todos os cenários tivessem 100% de mim. Foram dias curtos, noites ainda mais curtas, e um relógio que insistia em me fazer acordar às 4h30 para estar às 7h na faculdade, voltando para casa só à meia-noite. A exaustão quase me venceu, mas não consegui. Afinal, foram sete anos até chegar aqui.

Aos meus pais e à minha avó, minha base. Vocês sempre acreditaram em mim e investiram no meu conhecimento, dando o melhor que podiam para me abrir caminhos. Um agradecimento especial vai para o meu pai, que é, sem dúvidas, o cara! Dono de uma bagagem literária infinita, com uma citação de livro para cada momento, ele me ensinou o poder das palavras e da curiosidade. Sua biblioteca não é apenas um espaço físico, é um reflexo da sua mente.

Ao Raul, meu amor, meu melhor amigo e agora meu esposo. Definir você é quase impossível, mas se pudesse te resumir seria um "artista cigano tropical", com suas pinturas à óleo arrebatadoras (por que choras Monet? rs), com sua alma livre e seu desejo incansável de surfar aos sábados 06h da manhã. Obrigada por sempre me apoiar em todas as minhas escolhas, das mais malucas as mais sensatas. Te ver pintar me faz desacelerar e enxergar o quão gostoso é viver com você. Te amo.

Aos amigos que preencheram esses anos com aprendizados, risadas e aventuras. Breno e Igã, amigos de bons momentos, e claro, Raul ao lado, criando histórias dignas de filmes independente. Matheus, pela companhia implicante, mas sempre presente, que deixou forte em vários momentos, caronas, cafezinhos entre uma aula, e outra e por compartilhar essa jornada acadêmica comigo. E, para surpresa de todos, ainda conseguiu se formar antes de mim rs. Érica e João, com quem o tempo voa em conversas, regadas a bons vinhos. Quantas taças mesmo?!

Aos professores da faculdade SENAI CETIQT, que participaram da minha jornada acadêmica. Pelos ensinamentos, conselhos e risadas ao longo de todos esses anos. Em especial Geneci, Luciano, Alberto, Andréa, Letícia, Cláudia, André, Gilliani e Tanise, vocês são inspiração pura. À minha orientadora, Marta Picardo, minha guia neste projeto, obrigada pela paciência, pelas ideias inovadoras e por cada rota de raciocínio que me fez explorar. Seu apoio foi crucial para que este trabalho se tornasse o que é.

Aos meus ex's e atuais companheiros de trabalho Raquel, Mariana e Julio. Cada um com uma habilidade diferente e que me fizeram ser não só uma boa profissional, mas uma boa pessoa. Raquel confiou em mim desde o início e me proporcionou uma oportunidade de ouro, Mariana me ensinou sobre organização e o famoso urgente e importante. Julio sempre com muito bom humor, energia no alto e leveza em conduzir as demandas diárias. Sou fã! E a todos do Instituto da Criança, que de certa forma tiveram suas contribuições ao longo dessa jornada. Encerro com gratidão por cada pessoa que, de alguma forma, participou dessa trajetória. Vocês são parte do meu “remendar-se” e da alegria de dizer: eu consegui!

RESUMO

O presente estudo propõe-se a realizar uma análise do risco social em segmentos específicos de gasodutos no território brasileiro, utilizando a metodologia da Norma Técnica CETESB P4.261/2003. A escolha dessa metodologia foi motivada pelo incidente ocorrido no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá em 2021, destacando a relevância prática do trabalho. A análise considerou os efeitos de sobrepressão em quatro cenários, variando a densidade populacional e as condições do gasoduto. Dois cenários adotaram baixa densidade populacional (2,34 habitantes/km²), e os outros dois com alta densidade (150 habitantes/km²). Os resultados indicaram que o número de fatalidades aumenta proporcionalmente à densidade populacional, variando de 0,00145 no cenário de baixa densidade a 0,0933 no cenário de alta densidade. Esses dados reforçam a importância da gestão de riscos, com destaque para a necessidade de inspeções periódicas, manutenção preventiva e, em casos extremos, estratégias como redução do inventário ou alteração da rota do gasoduto para áreas menos vulneráveis. Assim, este trabalho contribui para o aprimoramento das práticas de segurança em gasodutos, promovendo a proteção das comunidades impactadas e a sustentabilidade das operações.

Palavras-chave: CETESB, gasoduto, Sobrepressão, Risco Social, Gestão de Riscos.

ABSTRACT

The present study aims to analyze social risk in specific segments of gas pipelines in Brazilian territory, using the methodology of the CETESB Technical Standard P4.261/2003. The choice of this methodology was motivated by the incident that occurred in the Cuiabá Lateral Transport Gas Pipeline in 2021, highlighting the practical relevance of this work. The analysis considered the effects of overpressure in four scenarios, varying the population density and pipeline conditions. Two scenarios involved low population density (2.34 inhabitants/km²), while the other two considered high density (150 inhabitants/km²). The results indicated that the number of fatalities increases proportionally with population density, ranging from 0.00145 in the low-density scenario to 0.0933 in the high-density scenario. These findings reinforce the importance of risk management, emphasizing the need for regular inspections, preventive maintenance, and, in extreme cases, strategies such as inventory reduction or altering the pipeline route to less vulnerable areas. Thus, this work contributes to improving safety practices in gas pipelines, promoting the protection of impacted communities and the sustainability of operations.

Keywords: CETESB, Gas Pipeline, Overpressure, Social Risk, Risk Management.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IMAGEM DO INCIDENTE NO GASODUTO DE TRANSPORTE LATERAL CUIABÁ EM 2021,– VISTA DA RODOVIA BR-07010.....	17
FIGURA 2 - DIAGRAMA DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL.	19
FIGURA 3 - MODELO GENÉRICO DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA).....	23
FIGURA 4 - FLUXO METODOLÓGICO PARA ANÁLISE DE RISCOS SOCIAIS EM TRECHOS DE GASODUTO.....	28
FIGURA 5 - MAPA DO GASODUTO.....	29
FIGURA 6 - VISTA AÉREA DO INCIDENTE PRÓXIMO À RODOVIA BR-07011 .	30
FIGURA 7 - ÁRVORE DE FALHAS DO INCIDENTE GASODUTO LATERAL CUIABÁ KM 606+900	31
FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DAS REGIÕES DE PROBABILIDADE DE FATALIDADE ASSOCIADAS AOS VALORES DE REFERÊNCIA PARA O EFEITO DE SOBREPRESSÃO	35

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PRESSÃO EM CADA DISTÂNCIA DA FONTE AO CENTRO PARA 15 METROS DE TUBULAÇÃO DANIFICADA NO TRECHO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO.....	36
TABELA 2 - PRESSÃO EM CADA DISTÂNCIA DA FONTE AO CENTRO PARA 30 METROS DE TUBULAÇÃO DANIFICADA EM NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO.....	37
TABELA 3 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 1.....	38
TABELA 4 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 2.....	39
TABELA 5 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 3.....	40
TABELA 6 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 4.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - COMPORTAMENTO DA PRESSÃO NA EMED CUIABÁ E NA EMED SAN MATIAS 30/01/21, ENVIADO PELA GOM.	30
GRÁFICO 2 - FUNÇÃO HIPERBÓLICA REPRESENTADA PELA EQUAÇÃO POLINOMIAL PARA CÁLCULO DE SOBREPRESSÃO.	33
GRÁFICO 3 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 1.	38
GRÁFICO 4 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 2.	40
GRÁFICO 5 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 3.	41
GRÁFICO 6 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 4.	42

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - TÉCNICAS APLICÁVEIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS EM GASODUTOS.....	21
QUADRO 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA ANÁLISE E GESTÃO DE RISCOS	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional de Petróleo
CETIQT	Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil
CETESB	Centro Tecnológico de Saneamento Básico de São Paulo
CR	Causa Raíz
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GOM	Empresa Gasocidente do Mato Grosso LTDA
FTA	Fault Tree Analysis (Árvore De Falhas)
NTS	Nova Transportadora do Sudeste
SENAI	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
RTDT	Regulamento Técnico de Duto Terrestre

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO	16
1.1 INTRODUÇÃO	16
1.2 OBJETIVOS	17
1.2.1 Objetivo Geral	17
1.2.2 Objetivos Específicos	18
1.3 JUSTIFICATIVA.....	18
1.4 DELIMITAÇÃO	18
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	19
2.1 TRANSPORTE DE FLUIDOS EM DUTOS	19
2.2 ANÁLISE DE RISCOS.....	20
2.2.1 Métodos de Análise de Riscos – Árvore de Falhas (FTA)	22
2.2.2 Análise Quantitativa de Risco	23
2.2.3 Análise de Vulnerabilidade e Avaliação dos Efeitos de Acidentes em Gasodutos	24
2.2.4 Sobrepressão.....	25
2.2.6 Risco Social e Risco Individual.....	26
2.3 NORMA CETESB	26
CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA.....	27
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	28
3.2. ESTUDO DE CASO - ACIDENTE EM GASODUTO LATERAL CUIABÁ 2021.....	28
3.2.1 O Incidente	28
3.2.2 Análise de fator causais	31
3.2.3 Cálculos efeitos gerados	32
3.2.3.1 Cálculo da massa para explosão física	32
3.2.4 Sobrepressão.....	33
CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1 SOBREPRESSÃO.....	36

4.1.1 Cenário 1	36
4.1.2 Cenário 2	36
4.1.3 Cenário 3	37
4.1.4 Cenário 4	37
4.2 CÁLCULO DE VULNERABILIDADE	38
4.2.1 Cenário 1	38
4.2.2 Cenário 2	39
4.2.3 Cenário 3	40
4.2.4 Cenário 4	41
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO	43
5.1 CONCLUSÃO.....	43
5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 INTRODUÇÃO

A energia fornecida pelo gás natural é uma poderosa fonte energética devido à sua menor poluição em comparação com outras fontes de energia, gerando menos resíduos e oferecendo flexibilidade a um custo relativamente baixo. Para viabilizar o fornecimento desse recurso até o consumidor final, é necessária a construção de gasodutos, responsáveis por transportar o gás extraído para os pontos de distribuição. No Brasil, onde 50% do consumo é proveniente do gás boliviano (Etesco, 2021), a instalação de gasodutos é crucial para atender às demandas de diversos setores da sociedade.

Entretanto, as atividades envolvidas no transporte de um fluido que pode gerar um evento acidental devido às suas características ou condições de processamento e/ou transporte demandam uma atenção especial no que diz respeito à análise e gerenciamento dos riscos sociais. A segurança das comunidades vizinhas e o bem-estar dos trabalhadores são questões primordiais, requerendo abordagens sistemáticas e eficazes para identificar, avaliar e mitigar os potenciais impactos sociais das operações industriais.

O incidente registrado no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá em 2021, operado pela Gasocidente do Mato Grosso Ltda (GOM) sofreu um rompimento que causou vazamento de gás e danos em propriedades, além de ferimentos leves em pessoas próximas. Não houve vítimas fatais. A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) realizou uma investigação e apontou que a causa inicial foi uma ação de terceiros, que danificou o duto. O relatório da ANP também identificou falhas no processo de inspeção e no gerenciamento de relacionamento com a comunidade, o que reforça a importância de uma manutenção e inspeção eficazes para prevenir tais incidentes.

FIGURA 1 - IMAGEM DO INCIDENTE NO GASODUTO DE TRANSPORTE LATERAL CUIABÁ EM 2021,– VISTA DA RODOVIA BR-07010



Fonte: Relatório de análise de investigação de incidente Gasoduto Lateral Cuiabá km 606+900 (ANP, 2022).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo geral analisar o risco social em trechos de gasoduto na região Sudeste do Brasil. Utilizando como referência a Norma Técnica CETESB P4.261, que fornece diretrizes claras e abrangentes para a avaliação dos riscos associados a empreendimentos industriais, considerando não apenas os aspectos técnicos, mas também as vulnerabilidades sociais das comunidades afetadas. Sua adoção como referência metodológica neste estudo busca garantir uma abordagem padronizada e consistente na identificação e avaliação dos potenciais impactos sociais dessas atividades industriais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto do risco social em trecho de gasoduto localizado na região Sudeste do Brasil, utilizando como referência a Norma Técnica CETESB P4.261, homologada em 2003, além de compreender as potenciais vulnerabilidades associadas às operações desses gasodutos.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Analisar o incidente do Gasoduto Lateral Cuiabá utilizando o relatório de Análise de Investigação de Incidente, elaborado pela ANP, quanto ao Risco Social
- Realizar o cálculo do número de Fatalidades e a plotagem da curva FN considerando trechos do Gasoduto Lateral Cuiabá variando a densidade populacional
- Propor medidas que possam viabilizar a continuidade da operação do Gasoduto no caso de Risco Não Tolerável

1.3 JUSTIFICATIVA

A análise do Risco Social em malhas de gasodutos é um aspecto fundamental na Gestão de Risco de projetos industriais, especialmente em um país como o Brasil, onde a expansão da infraestrutura energética é uma prioridade para o desenvolvimento econômico e social, tendo em vista que a oferta de gás natural na rede brasileira tende a crescer 37% de 2024 a 2034 (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, 2024). Com essa crescente demanda é natural que essas infraestruturas industriais sejam ampliadas nas regiões do país. Nesse cenário, compreender e mitigar riscos sociais associados a essas infraestruturas é essencial para garantir a segurança das comunidades afetadas e promover o desenvolvimento sustentável além de evitar possíveis incidentes como o ocorrido no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá em 2021, que serviu como um alerta para a necessidade de uma abordagem mais abrangente na gestão de riscos sociais em projetos de infraestrutura energética.

1.4 DELIMITAÇÃO

O presente estudo se concentra no incidente ocorrido no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá em 2021, se baseando no trabalho de campo realizado pela NTS, uma empresa de transporte de gás natural que desempenha um papel fundamental na cadeia logística de gás natural na região sudeste do Brasil. É realizada a avaliação do Risco Social em trechos do Gasoduto, simulando diferentes consequências variando a densidade populacional.

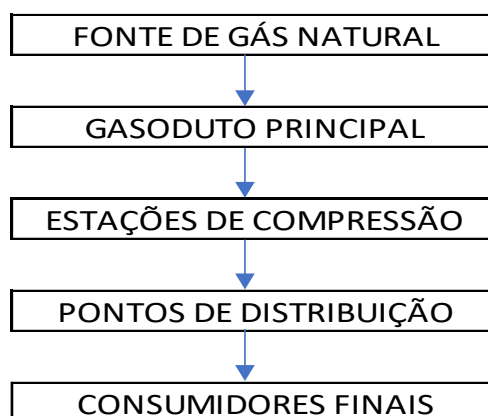
CAPÍTULO 2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSPORTE DE FLUIDOS EM DUTOS

O transporte de fluidos por dutos é amplamente utilizado na indústria para movimentar recursos como gás natural, petróleo e outros líquidos industriais. Esse método destaca-se por sua eficiência em transportar grandes volumes ao longo de extensas distâncias, reduzindo significativamente os riscos associados a outros meios de transporte, como o rodoviário ou ferroviário, além de minimizar custos operacionais (Mahajan, 2020). A operação contínua dos dutos, aliada à sua capacidade de reduzir o impacto ambiental, torna esse sistema uma escolha estratégica para empresas que lidam com grandes fluxos de fluidos.

O funcionamento desses dutos envolve uma estrutura composta por diferentes etapas e componentes essenciais, conforme ilustrado na Figura 2. O processo inicia-se na fonte de gás natural, onde o recurso é extraído e tratado para atender às especificações exigidas para o transporte. A partir daí, o gás é conduzido pelo gasoduto principal, que se estende por longas distâncias. Durante esse percurso, as estações de compressão desempenham um papel crucial, mantendo a pressão necessária para assegurar o fluxo contínuo e eficiente do gás, mesmo em trajetos extensos (Dey, 2021). Em seguida, o gás é direcionado para pontos de distribuição, onde é dividido para atender diferentes regiões até alcançar os consumidores finais, que incluem indústrias, usinas de energia e outros grandes consumidores.

FIGURA 2 - DIAGRAMA DE TRANSPORTE DE GÁS NATURAL.



Fonte: Própria, 2024.

Para garantir a segurança e a eficiência desse transporte, os dutos são construídos com materiais robustos, como o aço carbono, capazes de suportar altas pressões e condições ambientais adversas. As estações de compressão são projetadas para compensar as perdas de energia que ocorrem ao longo do duto, garantindo que o gás percorra grandes distâncias sem interrupções significativas (Dey, 2021). Esse aspecto é fundamental para assegurar a continuidade da operação e a estabilidade no fornecimento de gás.

No entanto, a proximidade dos dutos a áreas residenciais e ecossistemas sensíveis exige uma abordagem rigorosa de gestão de riscos, considerando os possíveis impactos para a comunidade e o meio ambiente. Vazamentos, explosões e outros incidentes podem representar ameaças significativas, tornando necessário o monitoramento constante e a adoção de medidas preventivas. O planejamento de emergências e a manutenção periódica são fundamentais para mitigar esses riscos e garantir a segurança das operações. A análise contínua desses fatores contribui para a minimização dos impactos negativos, permitindo que o transporte por dutos continue sendo uma alternativa segura, eficiente e sustentável para o escoamento de fluidos industriais (Mahajan, 2020).

2.2 ANÁLISE DE RISCOS

Ao se tratar de transporte de fluidos perigosos, como os gasodutos, a análise de riscos é um componente essencial na gestão desses projetos industriais, pois é caracterizada como um processo capaz de identificar perigos e avaliar as vulnerabilidades que podem comprometer a segurança das operações e impactar negativamente o meio ambiente e comunidades adjacentes.

A análise qualitativa de riscos é um método descritivo e subjetivo, que permite identificar e avaliar potenciais riscos sem a necessidade de cálculos numéricos complexos. Exemplo, a Análise Preliminar de Riscos (APR), uma das etapas iniciais desse processo, que identifica perigos potenciais antes do início das operações.

Em contrapartida, a análise quantitativa de riscos adota uma abordagem numérica para estimar a probabilidade e os impactos de cada risco, oferecendo uma visão detalhada e mensurável. Isso permite uma avaliação mais precisa para a tomada de decisões estratégicas.

A seguir, um quadro com as principais metodologias de análise qualitativa e quantitativa de riscos, organizadas de forma a ilustrar suas características e aplicações no contexto dos gasodutos (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009).

QUADRO 1 - TÉCNICAS APLICÁVEIS PARA IDENTIFICAÇÃO DE RISCOS EM GASODUTOS

FINALIDADE	TÉCNICAS APLICÁVEIS	DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO
Identificação de perigos	Análise Histórica	Analisa dados históricos de acidentes e incidentes para identificar padrões de risco e possíveis falhas recorrentes.	Útil para projetos semelhantes onde registros de incidentes passados podem indicar vulnerabilidades específicas.
	Lista de verificação (checklist")	Utiliza uma lista de perguntas ou critérios predefinidos para verificar a presença de potenciais perigos.	Adequada para avaliações de conformidade e inspeções de rotina em operações industriais.
	E se?	Pergunta "E se?" para diferentes cenários, ajudando a antecipar e identificar perigos potenciais.	Amplamente usada em sessões de brainstorming e para considerar hipóteses em situações de risco inesperado.
	Identificação de perigos (HAZID)	Identifica perigos em cada etapa de um processo específico, semelhante ao HAZOP, mas mais abrangente.	Utilizada para mapear riscos em projetos novos ou em grandes mudanças de processos, considerando várias áreas de operação.
	Análise preliminar de perigos (APP)	Realiza uma identificação inicial de perigos e avalia seu impacto antes do início das operações.	Aplicada nas fases de planejamento de projetos para estabelecer controles preventivos de segurança.
	Estudo de perigos e operabilidade (HAZOP)	Analisa riscos associados a desvios operacionais através de sessões multidisciplinares.	Focada em identificar e prevenir falhas operacionais nos processos industriais.
	Análise de modos e efeitos de falhas (FMEA)	Avalia modos de falha e seus impactos nas operações, classificando riscos pela gravidade, ocorrência e detectabilidade.	Ideal para setores industriais críticos, prioriza ações preventivas e corretivas.
	Análise preliminar de riscos (APR)	Identifica perigos potenciais no início do projeto, com foco preventivo.	Utilizada para definir medidas de controle nas fases iniciais, favorecendo uma base segura para o projeto.
Análise qualitativa de riscos	Estudos de perigo e operabilidade (HAZOP)	Analisa riscos associados a desvios operacionais através de sessões multidisciplinares.	Focada em identificar e prevenir falhas operacionais nos processos industriais.
	Análise preliminar de riscos (APR)	Identifica perigos potenciais no início do projeto, com foco preventivo.	Utilizada para definir medidas de controle nas fases iniciais, favorecendo uma base segura para o projeto.

QUADRO 1 - CONTINUAÇÃO

FINALIDADE	TÉCNICAS APLICÁVEIS	DESCRIÇÃO	APLICAÇÃO
Análise qualitativa de riscos	Análise de modos, efeitos e criticidade de falhas (FMECA)	Expande a FMEA ao considerar a criticidade de falhas, priorizando-as de acordo com a gravidade de seus efeitos.	Indicada para sistemas críticos onde falhas específicas podem ter impactos significativos na segurança e no meio ambiente.
Análise de consequências	Análise por árvore de eventos (ETA)	Utiliza modelagens para estimar os efeitos de um acidente, como dispersão de gás ou explosão.	Fundamental para simular cenários e planejar respostas a incidentes graves.
	Modelagem de efeitos físicos, tais como propagação de incêndio, explosão, dispersão de gases inflamáveis, tóxicos e fumaça		
	Modelagem de vulnerabilidade		
Análise de frequência	Análise por árvore de falhas (FTA)	Baseada em dados históricos para calcular a probabilidade de eventos específicos.	Auxilia em projeções para tomada de decisão e prevenção de acidentes.
	Análise por árvore de eventos (ETA)		
	Redes bayesianas		
Avaliação quantitativa de riscos	Análise quantitativa de riscos (AQR/QRA)	Quantifica probabilidades e consequências de riscos, fornecendo uma avaliação precisa e baseada em dados.	Essencial para projetos que exigem decisões de investimento em segurança com base em projeções numéricas detalhadas.
Avaliação semi-quantitativa de riscos	Análise de camadas de proteção (LOPA)	Avalia a efetividade de camadas de proteção em prevenir incidentes e quantifica o risco residual de falhas.	Útil para processos industriais complexos, auxiliando na decisão sobre a necessidade de camadas adicionais de segurança.

Fonte: Identificação de riscos em gasodutos. Adaptado da NBR ISO 31000:2009, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

2.2.1 Métodos de Análise de Riscos – Árvore de Falhas (FTA)

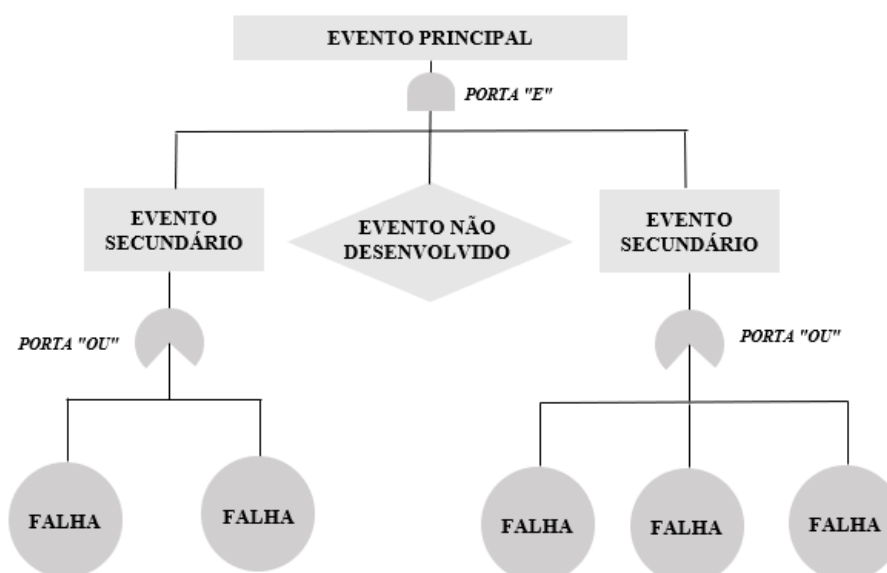
A Análise por Árvore de Falhas (Fault Tree Analysis – FTA) é uma técnica estruturada e gráfica amplamente utilizada para identificar e analisar as causas potenciais de falhas em sistemas complexos. Desenvolvida inicialmente na década de 1960 pela Bell Telephone Laboratories, a FTA permite investigar eventos adversos (chamados de "eventos de topo") de maneira hierárquica, decompondo-os em causas primárias e intermediárias até alcançar as falhas básicas (ERICSON, 2005).

A árvore de falhas funciona como um diagrama lógico que utiliza portas booleanas, como AND e OR, para representar a interação entre eventos causais. A metodologia se baseia na identificação dos fatores que, combinados, podem resultar na ocorrência de um evento

indesejado. Essa abordagem oferece uma visão clara dos caminhos críticos que devem ser mitigados para evitar incidentes futuros (MENDES-SILVA et al., 2018).

A figura 3 exemplifica um modelo genérico de uma árvore de falhas. O processo de construção segue uma sequência de etapas como a definição de um evento indesejado no topo como uma explosão, na sequência é realizado a identificação dos fatores que podem levar ao evento do topo, identificar as causas fundamentais por trás de cada fator intermediário, depois construir portas lógicas para conectar os eventos e representar a relação causal entre eles.

FIGURA 3 - MODELO GENÉRICO DE ÁRVORE DE FALHAS (FTA)



Fonte: Adaptado Ericson, C.A, 2005.

A FTA é amplamente aplicada na indústria de transporte de fluidos perigosos devido à sua capacidade de identificar falhas em sistemas interligados, como gasodutos. Em tais contextos, a técnica ajuda a prever situações de risco, como sobrepressões, vazamentos ou rupturas de dutos. Por exemplo, ao analisar um vazamento de gás, a árvore de falhas pode identificar como causas fundamentais a corrosão do duto, erros operacionais ou falhas no sistema de detecção de pressão (CHINAQUI, 2012; CETESB, 2011).

2.2.2 Análise Quantitativa de Risco

A análise quantitativa de risco aprofunda a compreensão dos riscos identificados por meio de cálculos matemáticos e simulações, permitindo quantificar a probabilidade de ocorrência de eventos adversos e suas possíveis consequências. Esta abordagem é fundamental para a avaliação de riscos em projetos complexos, como os que envolvem gasodutos, onde os efeitos de falhas podem ser catastróficos.

Entre os principais focos da análise quantitativa em gasodutos estão os efeitos físicos e térmicos resultantes de vazamentos ou rupturas. A Sobrepressão, por exemplo, refere-se ao aumento súbito da pressão interna de um duto, que pode levar à ruptura do material e à liberação descontrolada de gás. Esse evento pode desencadear uma série de efeitos térmicos, como a formação de bolas de fogo (fireballs) e incêndios, que representam graves riscos para a vida humana e para o meio ambiente (Baker et al., 2014).

2.2.3 Análise de Vulnerabilidade e Avaliação dos Efeitos de Acidentes em Gasodutos

A análise de vulnerabilidade é uma etapa fundamental dentro da avaliação quantitativa de riscos em gasodutos, pois foca na suscetibilidade de populações e infraestruturas a possíveis incidentes, como explosões, vazamentos ou outros cenários acidentais. Essa análise é conduzida a partir de duas perspectivas principais: o risco social, que mede o número de pessoas potencialmente afetadas por um evento adverso, e o risco individual, que avalia a probabilidade de uma pessoa específica sofrer danos em determinado local (Delvosalle et al., 2004).

O risco social é geralmente expresso em termos de fatalidades esperadas por ano ou por milhão de habitantes, enquanto o risco individual considera a exposição a eventos perigosos com base na localização e na proximidade de áreas urbanas densamente povoadas. Métodos como a Análise de Risco Individual (IRA) e a Análise de Risco Social (SRA) são amplamente empregados para quantificar esses riscos, permitindo a definição de estratégias de mitigação mais direcionadas para proteger tanto as comunidades quanto os trabalhadores envolvidos na operação dos gasodutos.

Além de avaliar a suscetibilidade populacional, a análise de vulnerabilidade também considera os danos potenciais aos seres humanos e às estruturas expostas a cenários acidentais. Esses danos podem resultar de diferentes efeitos físicos, como radiação térmica, sobrepressão e toxicidade. Para estimar a gravidade desses efeitos, são utilizados modelos matemáticos, entre os quais o modelo Probit (Pr) se destaca. Esse modelo relaciona a intensidade da exposição ao

efeito físico com a probabilidade de danos ou fatalidades, fornecendo uma previsão quantitativa dos impactos.

No caso da radiação térmica e da toxicidade, o modelo Probit calcula a probabilidade de danos com base em variáveis como a duração e a intensidade da exposição. Já os danos causados por sobrepressão são estimados com base em valores pré-estabelecidos, considerando o nível de sobrepressão como um fator determinante para a ocorrência de lesões ou mortes. A utilização desses modelos permite não apenas prever a gravidade dos acidentes, mas também guiar o planejamento de respostas emergenciais, oferecendo informações essenciais para minimizar os impactos em áreas vulneráveis.

Por fim, a integração das análises de vulnerabilidade com os modelos de previsão de danos físicos contribui para a criação de estratégias de mitigação mais robustas. Essa abordagem auxilia na redução dos riscos, na proteção das comunidades próximas aos gasodutos e no aumento da segurança operacional, garantindo maior resiliência frente a possíveis incidentes em instalações de transporte de gás natural.

2.2.4 Sobrepressão

A sobrepressão, decorrente de explosões, representa um risco significativo em incidentes envolvendo gasodutos. A pressão excessiva gerada por uma explosão pode causar danos catastróficos em um raio considerável ao redor do ponto de origem. A magnitude dos danos depende da distância em relação ao local da explosão e da intensidade da sobrepressão.

Estudos indicam que, para sobrepressões superiores a 0,3 bar, a probabilidade de fatalidade humana chega a 75%. Nesses casos, as estruturas também estão sujeitas a danos severos ou colapsos. Já em regiões onde a sobrepressão varia entre 0,1 e 0,3 bar, a probabilidade de fatalidade humana cai para cerca de 25%. Abaixo de 0,1 bar, os danos tendem a ser menos graves, mas ainda podem causar lesões significativas dependendo da proximidade e da duração da exposição (CETESB, 2011).

Esses limites de sobrepressão são críticos para a definição de zonas de perigo em torno de instalações que manipulam gases ou substâncias inflamáveis, como gasodutos e tanques de armazenamento, ajudando a definir planos de evacuação e proteção.

2.2.6 Risco Social e Risco Individual

A análise de vulnerabilidade no contexto de risco social e risco individual envolve uma avaliação detalhada dos impactos potenciais às populações circundantes. O risco individual refere-se à probabilidade máxima de uma única pessoa ser afetada dentro da zona de risco, independentemente do número total de pessoas presentes na área. Além disso, tem caráter cumulativo, o que significa que a resultante em um ponto x,y de interesse advém da soma do RI de cada cenário acidental com contribuição no citado ponto.

Já o risco social, refere-se ao risco para um determinado número ou agrupamento de pessoas expostas aos efeitos físicos decorrentes de um ou mais cenários acidentais. É possível que vários trechos com aglomerado populacional sejam cruzados ou tangenciados pelo traçado do duto em análise. O risco social deve ser estimado para todos esses trechos. A densidade populacional varia ao longo do dia, sendo maior nas áreas industriais durante o horário comercial e nas áreas residenciais à noite, com até 100% da população presente nesses períodos (CETESB, 2011).

A vulnerabilidade é determinada não apenas pela proximidade física de uma comunidade aos gasodutos, mas também por condições ambientais, como relevo, direção do vento e a presença de grandes edificações, que podem modificar a extensão e a gravidade dos danos causados (Mendes-Silva et al., 2018).

2.3 NORMA CETESB

A Norma Técnica CETESB P4.261, estabelecida pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo em 2003, é uma referência na análise de riscos sociais em projetos industriais no Brasil. Esta norma fornece diretrizes detalhadas para a identificação, avaliação e mitigação de riscos associados a empreendimentos industriais, contemplando tanto aspectos técnicos quanto sociais.

De acordo com a CETESB (2003), a metodologia inclui a análise de diversos fatores, como a proximidade de áreas residenciais, densidade populacional, vulnerabilidades sociais e infraestrutura local. A aplicação dessa norma visa garantir que todos os potenciais impactos sejam considerados e que medidas adequadas de mitigação sejam implementadas.

Estudos empíricos, como os de Souza e Almeida (2015), demonstram que a adoção da Norma CETESB P4.261 tem contribuído para a redução significativa de incidentes em infraestruturas industriais. A norma exige uma abordagem sistemática e integrada, que não apenas identifica

possíveis falhas técnicas, mas também considera as vulnerabilidades das comunidades afetadas. Abaixo a expansão da análise dos pontos abordados pela norma e o impacto dessa abordagem.

QUADRO 2 - ASPECTOS FUNDAMENTAIS PARA ANÁLISE E GESTÃO DE RISCOS

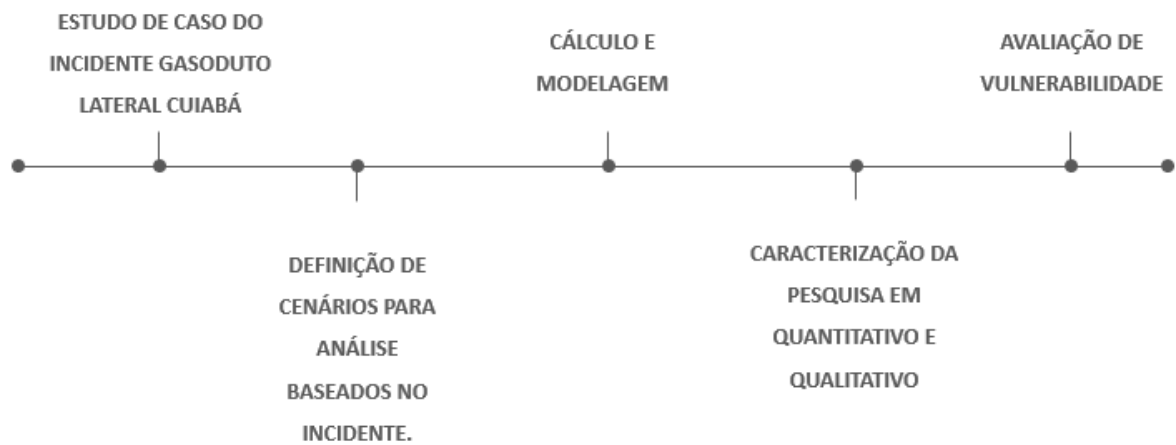
PONTO DE ANÁLISE	DESCRIÇÃO
Identificação de falhas técnicas e operacionais	A norma CETESB P4.261 exige análise detalhada das falhas potenciais, como erros operacionais e falhas mecânicas. Ferramentas como FMEA e HAZOP são usadas para antecipar problemas e reduzir riscos de incidentes.
Análise das vulnerabilidades das comunidades afetadas	Considera a proximidade de áreas residenciais e industriais e os riscos de exposição, além de avaliar os danos sociais e ambientais decorrentes de incidentes.
Abordagem integrada e sistêmica	A norma promove a integração entre análise técnica e social, buscando entender a interação entre sistemas tecnológicos e comunidades ao redor, com foco na segurança e mitigação de riscos.
Exigência de planos de mitigação e monitoramento contínuo	A norma exige a implementação de planos de mitigação para minimizar danos e a instalação de sistemas de monitoramento contínuo, garantindo respostas rápidas e eficazes a incidentes.

Fonte: Adaptado de CETESB norma técnica P4.261 - risco de acidente de origem tecnológica - método para decisão e termos de referência (2011).

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia adotada para a realização do estudo de análise de Risco Social em trechos de gasoduto na região Sudeste do Brasil. A pesquisa seguiu um método descritivo e documental, utilizando a Norma Técnica CETESB P4.261 como referência principal, conforme representado pelo fluxo na figura 4 abaixo. A escolha dessa norma se deve ao seu reconhecimento e aplicabilidade na avaliação dos riscos associados a empreendimentos industriais, especialmente aqueles que envolvem transporte de fluidos perigosos, como o gás natural.

FIGURA 4 - FLUXO METODOLÓGICO PARA ANÁLISE DE RISCOS SOCIAIS EM TRECHOS DE GASODUTO



Fonte: Própria, 2024

3.1 TIPO DE PESQUISA

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa e quantitativa. A abordagem qualitativa foi utilizada para descrever as características dos riscos sociais e vulnerabilidades das comunidades vizinhas aos gasodutos, enquanto a abordagem quantitativa envolveu a aplicação de modelos matemáticos para a avaliação dos riscos de forma objetiva.

Como base para a análise, foi realizado um estudo de caso focado no incidente ocorrido no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá, em 2021.

3.2. ESTUDO DE CASO - ACIDENTE EM GASODUTO LATERAL CUIABÁ 2021

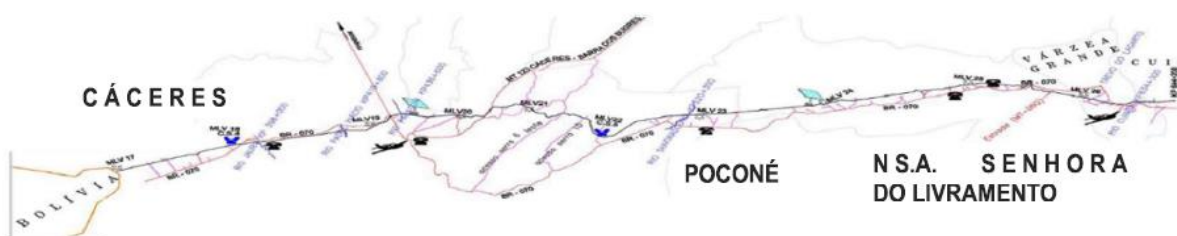
3.2.1 O Incidente

Em 30 de janeiro de 2021, a empresa Gasocidente do Mato Grosso Ltda. (GOM) comunicou à Agência Nacional do Petróleo (ANP) a ocorrência de um incidente no Gasoduto Lateral Cuiabá. A empresa relatou, que houve uma ruptura na tubulação do gasoduto, causando perda de contenção de gás natural no km 606, localizado em uma área rural no município de Nossa Senhora do Livramento – MT, na propriedade conhecida como “Fazenda Bom Jardim”. Embora tenha ocorrido vazamento de gás natural, a ruptura não resultou em explosão. As autoridades

locais foram acionadas e, por questões de segurança, interditaram a rodovia federal BR-070, próxima ao local do incidente e que liga Cuiabá à cidade de Cáceres.

O Gasoduto Lateral Cuiabá possui uma extensão total de 645 quilômetros, dos quais 362 km situam-se em território boliviano e os 283 km restantes em território brasileiro, sendo este último trecho operado pela Gasocidente. Com diâmetro externo de 18” no Brasil, o gasoduto inicia no Km 362+262, no município de Cáceres – MT, e atravessa os municípios de Cáceres, Nossa Senhora do Livramento, Poconé, Várzea Grande e Cuiabá, até alcançar a EMED Cuiabá, localizada nas instalações da UTE Cuiabá, no Km 644+918, como apresentado na figura 5.

FIGURA 5 - MAPA DO GASODUTO



Fonte: Relatório de análise de investigação de incidente Gasoduto Lateral Cuiabá km 606+900 (ANP, 2022).

Como medida de mitigação, foram instaladas válvulas de bloqueio a cada 15 metros de todo trecho. Essas válvulas foram configuradas para atuarem automaticamente em caso de queda abrupta de pressão, sendo programadas para se fecharem quando a redução da pressão ultrapassasse 3,5 kgf/cm². Como resultado, os segmentos do Gasoduto Lateral Cuiabá localizados à montante da válvula MLV-25 e à jusante da válvula MLV-26 foram isolados do trecho afetado pela ruptura. Na figura 6 é possível observar a área do local do acidente.

FIGURA 6 - VISTA AÉREA DO INCIDENTE PRÓXIMO À RODOVIA BR-07011



Fonte: Relatório de análise de investigação de incidente Gasoduto Lateral Cuiabá km 606+900 (ANP, 2022).

Na data e horário do incidente foi detectada queda significativa de pressão na entrada da EMED Cuiabá, por parte do operador de turno que estava na sala de operação, conforme registrado no Gráfico 1.

GRÁFICO 1 - COMPORTAMENTO DA PRESSÃO NA EMED CUIABÁ E NA EMED SAN MATIAS 30/01/21, ENVIADO PELA GOM.



Fonte: Relatório de análise de investigação de incidente Gasoduto Lateral Cuiabá km 606+900 (ANP, 2022).

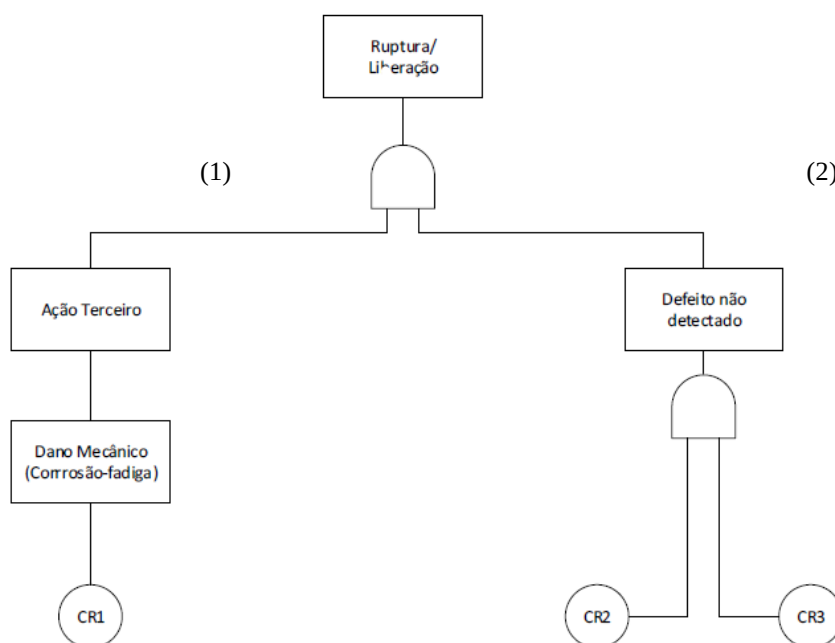
3.2.2 Análise de fator causais

A árvore de falhas apresentada no relatório de incidente não levou em consideração todas as causas do incidente, especialmente no que diz respeito à detecção do defeito. A análise identificou dois fatores principais relacionados ao evento: um associado a ações de terceiros e outro ao defeito não detectado, conforme apresentado na figura 7.

O primeiro fator (1) está relacionado a danos causados por atividades externas ao duto, como escavações ou outras intervenções realizadas sem o devido controle. Esses danos, como moissas no duto, resultaram em trincas, o que contribuiu para um problema de corrosão-fadiga.

O segundo fator (2) está relacionado à falha na detecção de defeitos. A inspeção com pig¹ deveria ocorrer anualmente, no entanto foi postergado ao longo de cinco anos sem justificativa técnica adequada. A postergação da inspeção contribuiu para a não detecção de moissas, que se transformaram em trincas devido à corrosão-fadiga, culminando na ruptura do duto.

FIGURA 7 - ÁRVORE DE FALHAS DO INCIDENTE GASODUTO LATERAL CUIABÁ KM 606+900



Fonte: Relatório de análise de investigação de incidente Gasoduto Lateral Cuiabá km 606+900 (ANP, 2022).

¹ A inspeção com pig é uma técnica usada para avaliar a condição interna de dutos, detectando falhas como corrosão, moissas e trincas. O dispositivo é movido pelo fluxo de material no pipeline, coletando dados em tempo real para garantir a integridade e segurança da infraestrutura.

A Figura 7 também destaca as causas-raízes dos fatores mencionados, identificadas como CR1, CR2 e CR3. A causa-raiz CR1 refere-se à falha na prevenção de danos causados por terceiros. O Regulamento Técnico de Dutos Terrestres (RTDT) estabelece que o transportador deve implementar um programa contínuo de prevenção de danos provocados por atividades externas, envolvendo obras sobre, sob ou nas proximidades das faixas de dutos (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, 2011).

As causas-raízes CR2 e CR3 estão relacionadas ao plano de inspeção inadequado. O RTDT determina que as inspeções em pontos sensíveis devem ser realizadas de acordo com procedimentos técnicos formalizados, abrangendo áreas críticas como cruzamentos, travessias, áreas geologicamente instáveis, áreas invadidas, válvulas de bloqueio e equipamentos do sistema de proteção catódica. Além disso, o plano de inspeção deve ser revisado e atualizado sempre que necessário, ou, no mínimo, a cada três anos, para garantir a integridade operacional do duto.

3.2.3 Cálculos efeitos gerados

3.2.3.1 Cálculo da massa para explosão física

O cálculo da massa explosiva do líquido pressurizado é realizado por meio da seguinte equação:

EQUAÇÃO 1 - EQUAÇÃO PARA CÁLCULO DA MASSA EXPLOSIVA

$$M_{TNT} = \left(9,745 \times 10^7 \frac{kg.mol.kgTNT}{L.kCal} \right) V \left(\frac{P_1}{P_0} \right) R_g T_0 \ln \left(\frac{P_1}{P_2} \right)$$

Fonte: Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd., CCPS, 2000.

Em que:

P_1 = Pressão absoluta calculada para rompimento do vaso aquecido (atm)

P_2 = Pressão absoluta final após expansão do gás (atm)

P_0 = Pressão absoluta atmosférica (atm)

R_g = Constante dos gases ideais (Claperon)

T_0 = Temperatura ambiente (K)

V = Volume no espaço vapor do vaso (Litros)

$9,745 \times 10^7$ = Fator de conversão considerando energia de 1 Kg TNT = 1.120 Kcal

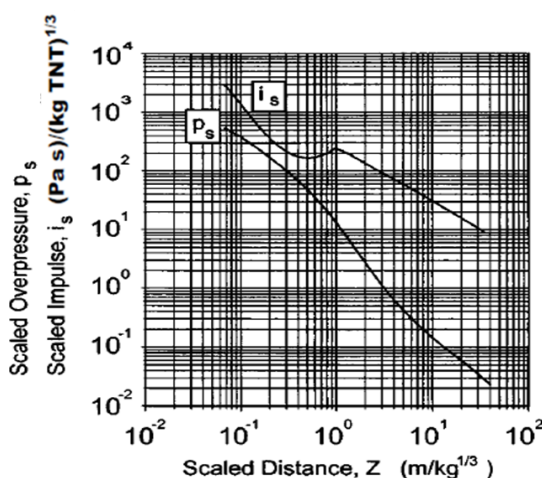
M_{TNT} = Massa Explosiva (Kg TNT)

A partir da massa calculada, será possível aplicar o modelo de sobrepressão para identificar a área afetada pelo incidente (Guidelines For Chemical Process Quantitative Risk Analysis 2nd., CCPS, 2000). Esse modelo permite a definição das zonas de perigo ao redor de instalações que manipulam gases, proporcionando a análise dos impactos físicos e das probabilidades de fatalidades, essenciais para o planejamento de medidas de mitigação e segurança.

3.2.4 Sobrepressão

Com a massa explosiva é possível calcular as distâncias que corresponde às regiões 1 e 2 (0,1 bar e 0,3 bar), de acordo com a Norma CETESB (Figura 8) a partir de uma equação polinomial que é representada pelo gráfico 1 cuja função é uma hipérbole. Onde posteriormente poderá ser efetuado o cálculo de vulnerabilidade devido à explosão, para que então possa ser calculado número de vítimas.

GRÁFICO 2 - FUNÇÃO HIPERBÓLICA REPRESENTADA PELA EQUAÇÃO POLINOMIAL PARA CÁLCULO DE SOBREPRESSÃO.



Fonte: Guidelines for chemical process quantitative risk analysis 2nd, 2000.

Para estimar o número de vítimas, foram considerados quatro cenários distintos, descritos a seguir:

- Cenário 1: Adotou-se a distribuição populacional da região de Nossa Senhora do Livramento, no estado de Mato Grosso, local do incidente, com densidade demográfica aproximada de 2,34 habitantes por quilômetro quadrado (hab/km²), considerando 15 metros de tubulação danificada.
- Cenário 2: Similar ao Cenário 1, mas considerando 30 metros de tubulação danificada.
- Cenário 3: Adotou-se a distribuição populacional da região de Cuiabá, no estado de Mato Grosso, com densidade demográfica aproximada de 150 hab/km², considerando 15 metros de tubulação danificada.
- Cenário 4: Similar ao Cenário 3, mas considerando 30 metros de tubulação danificada.

Os cálculos foram realizados conforme a Norma Técnica CETESB P4.261/2003, que orienta a aplicação de métodos específicos para estimativa do número de vítimas. A equação utilizada está descrita abaixo na Equação 2.

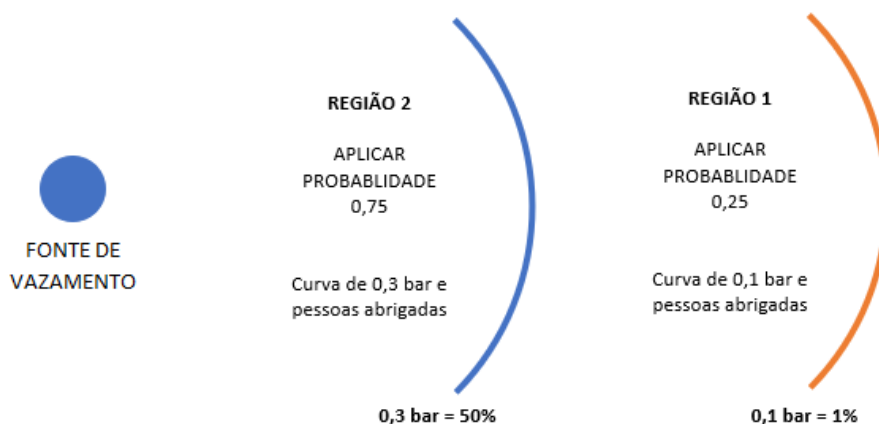
EQUAÇÃO 2 - MODELO DE SOBREPRESSÃO

$$N_i = 0,25Ne_1 + 0,75Ne_2$$

Fonte: Norma CETESB P4.261, Identificação de riscos em gasodutos, 2009.

Onde N_i representa número de fatalidades total considerando o trecho de cada cenário do Gasoduto, Ne_1 número de pessoas na região 1 (Figura 8), delimitada pelas curvas correspondentes à sobrepressão de 0,1bar, e Ne_2 representando número de pessoas na região 2 (Figura 8), delimitada pela curva correspondente à sobrepressão de 0,3bar e a fonte do vazamento. O número de fatalidades para cada região foi calculado considerando a área do toróide e a densidade populacional. Não foi feita distinção da população dia ou noite, nem considerou-se população abrigada.

FIGURA 8 - REPRESENTAÇÃO DAS REGIÕES DE PROBABILIDADE DE FATALIDADE ASSOCIADAS AOS VALORES DE REFERÊNCIA PARA O EFEITO DE SOBREPRESSÃO



Fonte: CETESB. Norma Técnica P4.261: Risco de Acidente de Origem Tecnológica - Método para Decisão e Termos de Referência. 2. ed. Dez. 2011.

3.3.5 Curva FN

No contexto da análise de risco social em gasodutos, a Curva F-N é uma ferramenta fundamental para a visualização e avaliação de cenários acidentais. Essa curva correlaciona a frequência de ocorrência de eventos (F), (Reference Manual Bevi Risk Assessments. Version 3.2, 2009), com o número de vítimas associadas (N), proporcionando uma perspectiva quantitativa da gravidade e da probabilidade dos incidentes (CETESB, Norma Técnica P4.261, 2014).

Com isso, a frequência adotada para o cálculo de riscos no presente estudo, definida como 5×10^{-7} ocorrências por ano, está alinhada às diretrizes estabelecidas pelo Manual BEVI (Besluit Externe Veiligheid Inrichtingen), referência utilizada em análises de risco para instalações industriais de grande porte e infraestrutura crítica, como gasodutos.

Portanto, a Curva F-N foi construída para os quatro cenários acidentais definidos no estudo, considerando o levantamento de pares ordenados de frequência e número de vítimas ao longo da extensão do gasoduto. Para isso, diferentes pontos de liberação de fluido perigoso foram analisados, levando em conta variáveis como densidade populacional, condições operacionais e as potenciais consequências de cada evento em cada cenário.

CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 SOBREPRESSÃO

4.1.1 Cenário 1

Para o cálculo realizado para identificação da massa explosiva foi adotado volume de $2,5 \times 10^3$ litros, pois o tamanho do tubo utilizado foi de 15 metros, pois foi a distância danificada. A partir disto as demais variáveis adotaram os seguintes valores no momento do incidente, onde temperatura ambiente de 297,15 K, pressão absoluta atmosférica 1 atm, pressão absoluta calculada para rompimento do vaso aquecido de 96,2 atm, pressão absoluta final após expansão do gás 34,9 atm.

A massa obtida foi de 5,72 kg TNT, as distâncias ao centro obtidas para cada região (0,1 bar e 0,3 bar) estão apresentadas na Tabela 1.

TABELA 1 - PRESSÃO EM CADA DISTÂNCIA DA FONTE AO CENTRO PARA 15 METROS DE TUBULAÇÃO DANIFICADA NO TRECHO DE NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO

SOBREPRESSÃO (BAR)	FATALIDADE (FRAÇÃO)	DISTÂNCIA FONTE AO CENTRO (m)
0,10	0,01	25
0,15	-	18
0,30	0,5	11

Fonte: Própria, 2024.

De acordo com a metodologia da CETESB é possível observar que a pressão de 0,3 bar existe 50% de fatalidade em um raio de 11 metros, e que a uma pressão de 0,1 bar existe 1% de fatalidade a uma distância de 25 metros, isso para um cenário de 15 metros de tubulação danificada na região de Nossa Senhora do Livramento.

4.1.2 Cenário 2

Para o cálculo realizado para identificação da massa explosiva, no cenário 2, foi adotado volume de $4,92 \times 10^3$ litros, pois o tamanho do tubo utilizado foi de 30 metros. A partir disto as demais variáveis adotaram os seguintes valores no momento do incidente, onde temperatura ambiente de 297,15 K, pressão absoluta atmosférica 1 atm, pressão absoluta calculada para rompimento do vaso aquecido de 96,2 atm, pressão absoluta final após expansão do gás 34,9 atm.

A massa obtida foi de 11,43 kg TNT, as distâncias ao centro obtidas para cada região estão apresentadas na Tabela 2.

TABELA 2 - PRESSÃO EM CADA DISTÂNCIA DA FONTE AO CENTRO PARA 30 METROS DE TUBULAÇÃO DANIFICADA EM NOSSA SENHORA DO LIVRAMENTO

SOBREPRESSÃO (BAR)	FATALIDADE (FRAÇÃO)	DISTÂNCIA FONTE AO CENTRO (m)
0,10	0,01	30
0,15		22
0,30	0,5	14

Fonte: Própria, 2024.

A partir da tabela 2 é possível observar que a pressão de 0,3 bar existe 50% de fatalidade em um raio de 14 metros. e que a uma pressão de 0,1 bar existe 1% de fatalidade a 30 metros e isso para um cenário de 30 metros de tubulação danificada na região de Nossa Senhora do Livramento, em Mato Grosso.

4.1.3 Cenário 3

Como o Cenário 3 apresenta a mesma extensão de tubulação danificada que o Cenário 1, os cálculos e variáveis para a obtenção da massa explosiva devem ser considerados iguais.

4.1.4 Cenário 4

Como o Cenário 4 apresenta a mesma extensão de tubulação danificada que o Cenário 2, os cálculos e variáveis para a obtenção da massa explosiva devem ser considerados iguais.

4.2 CÁLCULO DE VULNERABILIDADE

4.2.1 Cenário 1

A área dos toroides foi determinada calculando-se a área por $\pi D^2/4$, e subtraindo as regiões para determinar apenas a área do toróide respectivo à probabilidade de fatalidades 50% e 1%, a Tabela 3 apresenta estes resultados.

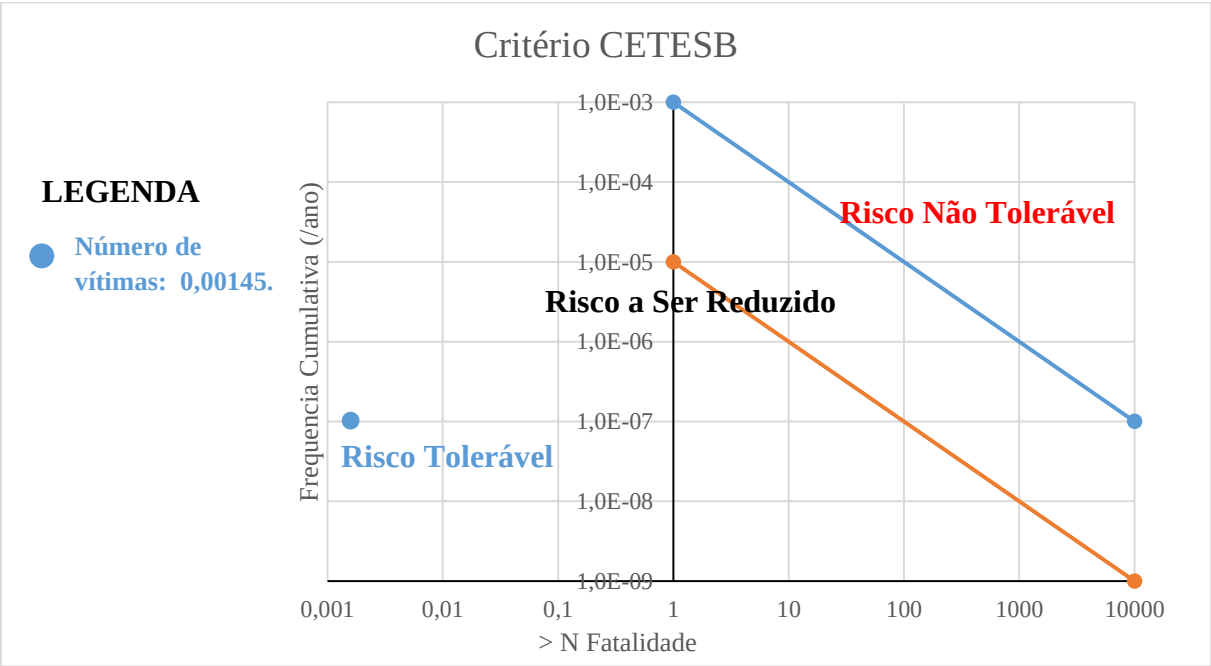
TABELA 3 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 1

DESCRIÇÃO	RAIO (m)	ÁREA (m²)
Probabilidade de fatalidade 0,01	25	1.963
Probabilidade de fatalidade 0,50	11	380
Sem habitantes	5	79

Fonte: Própria, 2024

Com a densidade populacional é possível calcular o número de fatalidades do acidente que foi de 0,00145.

GRÁFICO 3 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 1.



Fonte: Própria, 2024

No cenário 1, o incidente, conforme descrito no relatório, impactou duas residências localizadas nas proximidades da área afetada. Contudo, os cálculos realizados indicam que o incidente pode ser caracterizado como tolerável, não resultando em fatalidades (0 fatalidades).

4.2.2 Cenário 2

A área dos toroides foi determinada calculando-se a área por $\pi D^2/4$, e subtraindo as regiões para determinar apenas a área do toróide respectivo à probabilidade de fatalidades 50% e 1%, a Tabela 4 apresenta estes resultados.

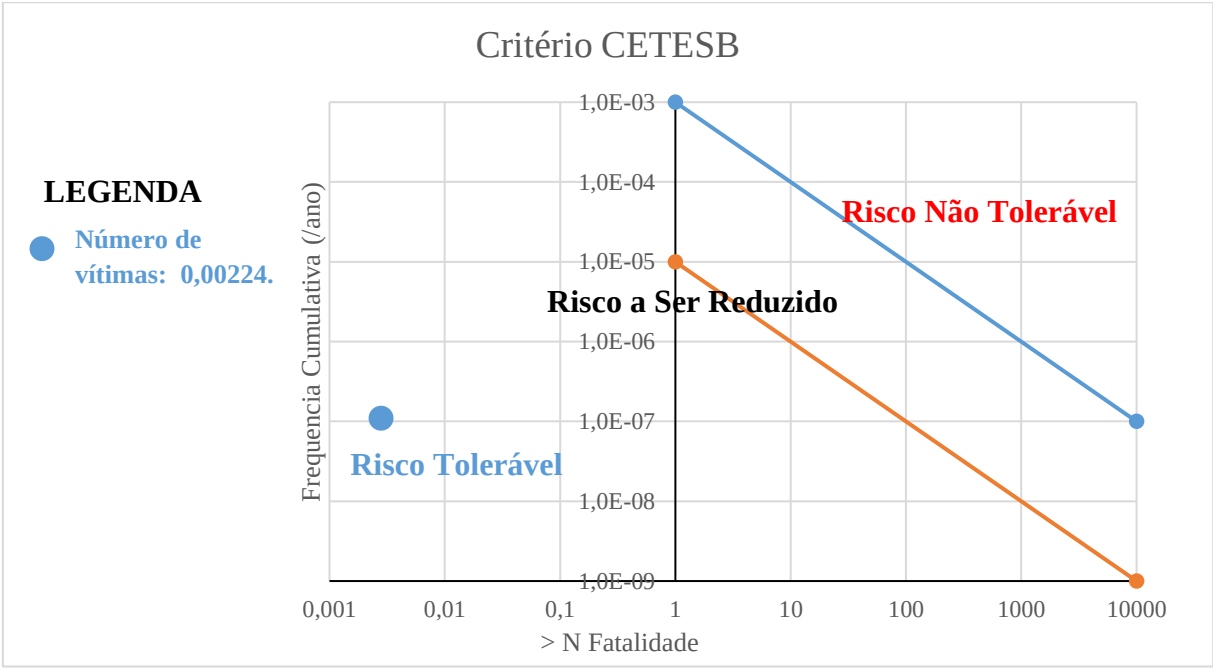
TABELA 4 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 2

DESCRIÇÃO	RAIO (m)	ÁREA (m²)
Probabilidade de fatalidade 0,01	30	2.827
Probabilidade de fatalidade 0,50	14	616
Sem habitantes	5	79

Fonte: Própria, 2024

Com a densidade populacional é possível calcular o número de fatalidades do acidente que foi de 0,00224, além de traçar a curva FN (Gráfico 4).

GRÁFICO 4 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 2.



Fonte: Própria, 2024

No cenário 2, de acordo com os cálculos realizados indicam que o incidente pode ser caracterizado como tolerável, não resultando em fatalidades (0 fatalidades).

4.2.3 Cenário 3

A área dos toroides foi determinada calculando-se a área por $\pi D^2/4$, e subtraindo as regiões para determinar apenas a área do toróide respectivo à probabilidade de fatalidades 50% e 1%, a Tabela 5 apresenta estes resultados.

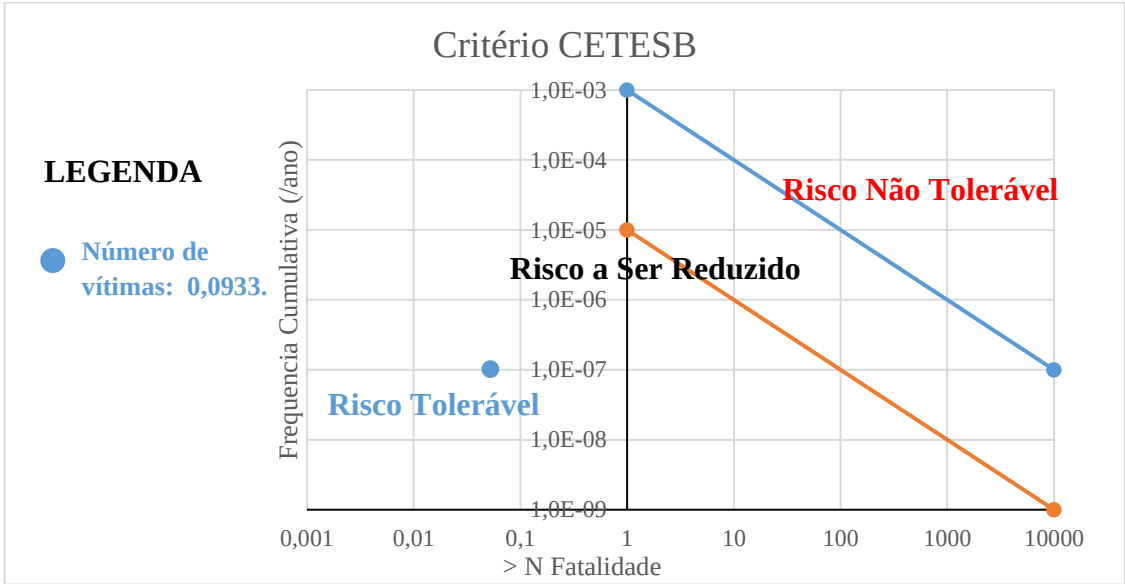
TABELA 5 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 3

DESCRIÇÃO	RAIO (m)	ÁREA (m²)
Probabilidade de fatalidade 0,01	25	1.963
Probabilidade de fatalidade 0,50	11	380
Sem habitantes	5	79

Fonte: Própria, 2024

Com a densidade populacional é possível calcular o número de fatalidades do acidente que foi de 0,0933, além de traçar a curva FN (Gráfico 5).

GRÁFICO 5 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 3.



Fonte: Própria, 2024.

No cenário 3, de acordo com os cálculos realizados indicam que o incidente pode ser caracterizado como tolerável, não resultando em fatalidades (0 fatalidades).

4.2.4 Cenário 4

A área dos toroides foi determinada calculando-se a área por $\pi D^2/4$, e subtraindo as regiões para determinar apenas a área do toróide respectivo à probabilidade de fatalidades 50% e 1%, a Tabela 6 apresenta estes resultados.

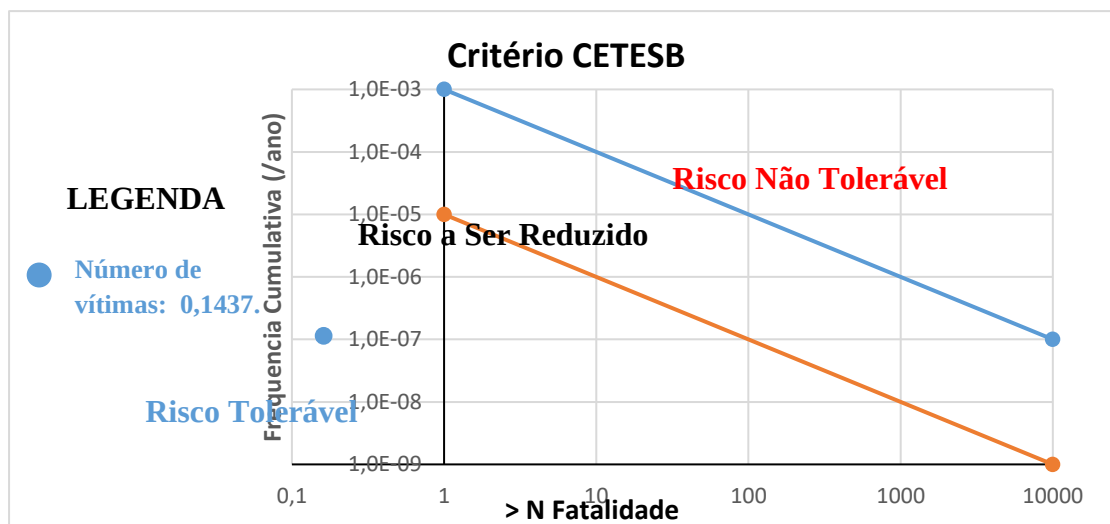
TABELA 6 - PROBABILIDADE DE FATALIDADE POR DISTÂNCIA REFERENTE AO CENÁRIO 4

DESCRIÇÃO	RAIO (m)	ÁREA (m²)
Probabilidade de fatalidade 0,01	30	2.827
Probabilidade de fatalidade 0,50	14	616
Sem habitantes	5	79

Fonte: Própria, 2024.

Com a densidade populacional é possível calcular o número de fatalidades do acidente que foi de 0,1437, além de traçar a curva FN (Gráfico 6).

GRÁFICO 6 - CLASSIFICAÇÃO DE GRAVIDADE DOS RISCOS DE INCIDENTE NO CENÁRIO 4



Fonte: Própria, 2024.

No cenário 4, de acordo com os cálculos realizados indicam que o incidente pode ser caracterizado como tolerável, não resultando em fatalidades (0 fatalidades).

A análise dos resultados demonstrou que existe uma relação direta entre o aumento da densidade populacional e o número de fatalidades estimadas em incidentes envolvendo gasodutos. No Cenário 1, correspondente a uma área de baixa densidade populacional (2,34 habitantes/km²), o número de fatalidades calculado foi de 0,00145, evidenciando um risco tolerável para a região. Já o cenário 2, considerando a mesma densidade populacional, mas com massa explosiva maior de 11,43 kg de TNT, os efeitos de sobrepressão se estendem por distâncias maiores, aumentando o potencial de danos e o número de fatalidades dentro das áreas afetadas, representado pelo valor 0,00224.

Já no Cenário 3, representando uma área de alta densidade populacional (150 habitantes/km²), o número de fatalidades subiu significativamente para 0,0933, indicando que a densidade populacional é um fator crítico na avaliação dos impactos de um evento acidental. Enquanto que no cenário 4, onde é considerado a mesma densidade populacional, mas com massa explosiva maior de 11,43 kg de TNT o número de fatalidade foi de 0,1437.

Portanto para regiões densamente povoadas, a evacuação da população em caso de emergência seria impraticável. Nesse contexto, medidas preventivas tornam-se fundamentais, incluindo inspeções recorrentes e rigorosas, manutenção contínua para preservar a integridade do duto e, em casos extremos, a redução de inventário de fluidos ou até mesmo o redesenho do traçado do gasoduto para evitar áreas de alta vulnerabilidade.

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÃO

5.1 CONCLUSÃO

A análise realizada demonstrou que a avaliação de riscos sociais em trechos de gasodutos na região Sudeste do Brasil, baseada na Norma Técnica CETESB P4.261/2003, apresenta uma abordagem relevante para garantir a segurança das comunidades adjacentes e a sustentabilidade das operações industriais. No entanto, destaca-se a necessidade de considerar margens de erro nos cálculos realizados, reconhecendo as limitações inerentes aos modelos aplicados. Uma abordagem adicional, como a utilização da árvore de falhas, poderia ser relevante para uma análise mais detalhada das possíveis falhas no sistema e suas interações, proporcionando uma melhor avaliação das incertezas envolvidas.

Os cálculos de sobrepressão, vulnerabilidade e fatalidades forneceram subsídios claros para compreender os impactos de incidentes em diferentes cenários. No caso do Cenário 1, em uma área de baixa densidade populacional, foi constatado que o risco era tolerável, com probabilidade de fatalidade de 0,00145 vítimas. Já no Cenário 3, em uma área de alta densidade, essa probabilidade subiu para 0,0933 vítimas, evidenciando a relevância de incorporar dados populacionais na avaliação de riscos. Embora os cálculos tenham indicado que não haveria vítimas dentro dos raios definidos pelas áreas de impacto, é importante ressaltar que os resultados estão sujeitos a margens de incerteza. No incidente estudado, por exemplo, duas residências foram atingidas, mas não houve vítimas apenas porque os moradores estavam ausentes no momento, reforçando a necessidade de cautela ao interpretar os dados e revisitar os locais do trecho de gasoduto para atualizar informações geográficas, incluindo a densidade populacional da região.

Para cenários em que o risco é classificado como não tolerável faz-se necessário medidas como a instalação de mais válvulas de bloqueio estratégico e o fortalecimento do monitoramento

contínuo para garantir a integridade do duto são relevantes na gestão do risco. Portanto, os resultados alcançados reforçam a necessidade de considerar variáveis que capturem melhor a realidade do entorno, incluindo aspectos sociais e demográficos atualizados.

5.2 SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Como continuidade deste estudo, sugere-se a realização de simulações detalhadas utilizando softwares de Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). Essa ferramenta permite uma modelagem mais precisa dos cenários analisados, incluindo a propagação de sobrepressão, os efeitos térmicos e a dispersão de gases em eventos acidentais. A aplicação de CFD possibilitaria uma compreensão mais aprofundada dos fenômenos físicos envolvidos, proporcionando maior confiabilidade nas estimativas de impacto em diferentes densidades populacionais e condições operacionais.

Além disso, as simulações em CFD poderiam complementar os cálculos realizados neste estudo, permitindo validar e refinar os resultados apresentados, sendo particularmente útil em cenários de alta complexidade, onde fatores como topografia, condições atmosféricas e geográficas influenciam significativamente os efeitos de um possível incidente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSON, J. D. Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw Hill, 1995.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). Regulamento Técnico de Dutos Terrestres para Movimentação de Petróleo, Derivados e Gás Natural (RTDT). Documento aprovado pela Resolução de Diretoria nº 98, de 2 de fevereiro de 2011.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Estudos do Plano Decenal de Expansão de Energia 2034: Gás Natural. Brasília: Ministério de Minas e Energia, setembro 2024.

CAMPOS, Geraldo. Oferta de Gás Natural no Brasil Deve Crescer. Poder 360, 23 de julho de 2023. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/energia/oferta-de-gas-natural-no-brasil-deve-crescer-34-ate-2032/>. Acesso em: 08 de abril de 2024.

CHINAQUI, Emerson. Análise e Gerenciamento de Riscos de Processo na Indústria Química. Tese (Engenharia Química). Escola de Engenharia de Lorena. Universidade de São Paulo, 2012.

CRAWLEY, F.; TYLER, B. HAZOP: Guide to Best Practice: Guidelines to Best Practice for the Process and Chemical Industries. IChemE, 2015. Disponível em: Wiley Online Library.

DEY, P. Materials Selection for Pipelines: Addressing Corrosion and Fatigue. Journal of Materials Science, v. 56, n. 8, p. 4152-4163, 2021.

ERICSON, C. A. Hazard Analysis Techniques for System Safety. Wiley-Interscience, 2005.

ETESCO. O que é gasoduto e como ele funciona. Disponível em: <https://etesco.com.br/o-que-e-gasoduto-e-como-ele-funciona/#:~:text=Gasoduto%3A%20Seguran%C3%A7a,A%20import%C3%A2ncia%20do%20gasoduto,de%20uma%20forma%20mais%20recorrente..> Acesso em: 08 de abril de 2024.

LEAL, P. R.; SANTOS, M. A. Riscos e Impactos Sociais de Gasodutos. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 24, n. 1, p. 45-59, 2019.

MAHAJAN, R. Pipeline Transportation: Safety, Efficiency, and Environmental Considerations. Energy and Environmental Review, v. 65, n. 3, p. 495-509, 2020.

MENDES-SILVA, G. P.; DIB-NETO, I. K. G.; FONTOURA, G. A. T.; RODRIGUES, F. A. Avaliação Quantitativa de Risco como Ferramenta para Determinação dos Riscos de Processos Industriais. *Revista Virtual de Química*, v. 10, n. 4, 2018.

MINISTRY OF INFRASTRUCTURE AND WATER MANAGEMENT (The Netherlands). Bevi Manual - Guidelines for Quantitative Risk Assessment. The Hague: Directorate-General for Public Works and Water Management, 2009.

NTS. Relatório de Investigação do Incidente no Gasoduto de Transporte Lateral Cuiabá. NTS, São Paulo, 2021.

SÃO PAULO. Governo do Estado. Análise de Risco Tecnológico. Conceito de Risco. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/analise-risco-tecnologico/conceito-de-risco/#:~:text=A%20norma%20CETESB%20P4.,avalia%C3%A7%C3%A3o%20do%20risco%20dos%20empreendimentos..> Acesso em: 07 de abril de 2024.

SCHROEDER, S.; HILL, C.; WATKINS, M. Integrating ESG Principles in Pipeline Operations: Case Studies and Best Practices. *Journal of Sustainable Infrastructure*, v. 12, n. 2, p. 134-149, 2022.

SOUSA, J. P.; ALMEIDA, V. R. Aplicação da Norma CETESB P4.261 na Avaliação de Riscos em Gasodutos. *Revista de Engenharia e Tecnologia*, v. 22, n. 3, p. 135-149, 2015.

STAMATIS, D. H. Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution. ASQ Quality Press, 2003.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education, 2007.

Página de assinaturas


Marta Picardo
Signatário


Adriana Barbosa
Signatário

Assinado eletronicamente
Maximiano Martins
Signatário

Assinado eletronicamente
Frederico Cabral
Signatário

HISTÓRICO

02 dez 2024 00:00:52		Jhébica Inglat criou este documento. (Email: jhessicaarochoa@gmail.com)
02 dez 2024 18:40:16		Marta Cristina Picardo (Email: mcpicardo@cetiqt.senai.br) visualizou este documento por meio do IP 200.225.199.125 localizado em Belo Horizonte - Minas Gerais - Brazil
02 dez 2024 18:40:27		Marta Cristina Picardo (Email: mcpicardo@cetiqt.senai.br) assinou este documento por meio do IP 200.225.199.125 localizado em Belo Horizonte - Minas Gerais - Brazil
02 dez 2024 19:15:27		Adriana Alves Barbosa (Email: aabarbosa@cetiqt.senai.br) visualizou este documento por meio do IP 186.205.26.136 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil
02 dez 2024 19:15:30		Adriana Alves Barbosa (Email: aabarbosa@cetiqt.senai.br) assinou este documento por meio do IP 186.205.26.136 localizado em Rio de Janeiro - Rio de Janeiro - Brazil
02 dez 2024 19:41:28		Maximiano Correia Martins (Email: mcmartins@cetiqt.senai.br) visualizou este documento por meio do IP 200.225.199.125 localizado em Belo Horizonte - Minas Gerais - Brazil
02 dez 2024 19:43:24		Maximiano Correia Martins (Email: mcmartins@cetiqt.senai.br) assinou este documento por meio do IP 200.225.199.125 localizado em Belo Horizonte - Minas Gerais - Brazil
03 dez 2024 15:15:43		Frederico do Nascimento Cabral (Email: frederico.cabral@rmeconsultoria.com) visualizou este documento por meio do IP 179.34.171.38 localizado em São Gonçalo - Rio de Janeiro - Brazil



03 dez 2024

15:16:02



Frederico do Nascimento Cabral (Email: frederico.cabral@rmeconsultoria.com) assinou este documento por meio do IP 179.34.171.38 localizado em São Gonçalo - Rio de Janeiro - Brazil

