



# **Desenvolvimento de Planilha de Cálculo de Vulnerabilidade Aplicada a Cenários de Risco de um HAZOP**

**Fernando Vecchiati da Silva Pereira**

**Henrique Varanda Paiva**

## **Projeto Final em Engenharia Química**

**Orientador**

**Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.**

**Junho 2014**

# **Desenvolvimento de Planilha de Cálculo de Vulnerabilidade Aplicada a Cenários de Risco de um HAZOP**

***Fernando Vecchiati da Silva Pereira***

***Henrique Varanda Paiva***

Projeto Final em Engenharia Química submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

---

Clara Schreiber Maia, Eng.

---

Lauro Melo, D.Sc.

---

Paulo Fernando Frutuoso, D.Sc.

Orientador por:

---

Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil  
Junho de 2014

Vecchiati, Fernando. Paiva, Henrique Varanda.

Desenvolvimento de Planilha de Cálculo de Vulnerabilidade Aplicada a Cenários de Risco de um HAZOP / Fernando Vecchiati da Silva Pereira, Henrique Varanda Paiva. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2014.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2014.

Orientador: Carlos André Vaz Junior.

- i. HAZOP
- ii. Análise de Vulnerabilidade
- iii. Segurança de Processos

*"Conhecer é sobreviver e ignorar o fundamental é cortejar o desastre"*  
*"To know is to survive and to ignore fundamentals is to court disaster."*

(H. H. Fawcett)

## **AGRADECIMENTOS**

### ***Agradecimentos Gerais***

Primeiramente ao Carlos André, por nos dar as direções necessárias, corrigir e valorizar quando necessário, e por sua atenção durante todo este processo;

A todo corpo docente da Escola de Química da UFRJ, por todo ensinamento e dedicação em nos tornar Engenheiros;

A todos os colegas profissionais da área de segurança que nos incentivaram com materiais e conhecimentos para aplicar neste projeto;

Aos nossos amigos e familiares que nos apoiaram durante toda nossa formação acadêmica.

### ***Fernando Vecchiati da Silva Pereira***

Agradeço ao meus pais pelo exemplo, apoio e a confiança durante todas as etapas da minha vida;

Aos meus avós, tios, primos e irmão pelo carinho e companheirismo;

Agradeço a Tathiana pelo companheirismo, paciência com as minhas ansiedades e a minha ausência em diversos momentos. Mesmo em alguns momentos não sabendo como ajudar, com amor e muita compreensão foi crucial para a conclusão deste estudo;

Aos meus amigos que tenho há 10 anos que estão sempre do meu lado nas horas mais importantes.

### ***Henrique Varanda Paiva***

Agradeço a minha mãe, Ana Tereza, pelo incentivo e carinho dado durante toda minha criação, e a meu pai, Marco Aurélio, por sempre ter sido o meu exemplo máximo de dedicação, empenho e superação, tanto como pessoa quanto profissionalmente;

A meus irmãos, Mauricio e Gustavo, por sempre estarem ao meu lado quando preciso;

À minha sempre carinhosa namorada, Mariana, que além de compartilhar comigo a história que vivi na Escola de Química, foi fundamental para meu amadurecimento pessoal;

Aos meus colegas e amigos queridos, que juntos dividimos vitórias e derrotas nesse caminho até nos tornarmos engenheiros.

Resumo do Projeto de Final de Curso apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

## **Desenvolvimento de Planilha de Cálculo de Vulnerabilidade Aplicada a Cenários de Risco de um HAZOP**

Fernando Vecchiati da Silva Pereira

Henrique Varanda Paiva

Junho, 2014

Orientador: Prof. Carlos André Vaz Junior, D.Sc.

Significativo avanço tecnológico tem sido feito na segurança de processos químicos. Hoje, a área tem se desenvolvido dentro de uma disciplina específica que inclui muitas técnicas práticas e teorias complexas. Avanços recentes para uma planta química segura enfatizam o uso tecnológico apropriado de ferramentas que fornecem informações para tomadas de decisão relacionadas ao projeto e operação de unidades. Com base nisso, o principal objetivo deste estudo foi identificar todos os possíveis desvios, através da elaboração de um HAZOP, do Sistema de Compressão de Gás de uma unidade Off-shore. Desvios estes que poderiam levar a danos à saúde e segurança pessoal dos operadores, danos ambientais, perda de equipamentos e/ou danos à imagem da empresa. Também foram identificados desvios nos parâmetros de processo que poderiam causar perda de produção ou uma redução na qualidade do produto. Alguns cenários envolvendo vazamentos foram indicados no HAZOP e então aprofundados em uma de Análise de Vulnerabilidade. A Análise de Vulnerabilidade consiste no conjunto de modelos e técnicas usadas à estimativa das áreas potencialmente sujeitas aos efeitos danosos de liberações acidentais de substâncias perigosas e/ou energia de forma descontrolada. Estas liberações descontroladas geram os chamados efeitos físicos dos acidentes (sobrepessão, fluxo térmico e nuvens de gases tóxicos) que potencialmente podem gerar danos às pessoas e/ou instalações. A extensão dos possíveis danos é delimitada pela intensidade do efeito físico causador do dano, sendo que a relação entre a intensidade do efeito físico e o dano correspondente fica estabelecida por meio dos modelos de vulnerabilidade. Foram selecionados dois eventos de risco moderado identificados no HAZOP: ruptura e furo de linha. Calculou-se o volume potencial vazado nos primeiros 3 minutos de evento chegando ao maior volume vazado de 4698,80 m<sup>3</sup> no caso da ruptura e 47 m<sup>3</sup> para o furo. Na sequência, considerou-se que apenas metade dos volumes vazados se acumulava no interior da plataforma, criando uma nuvem potencialmente explosiva. Utilizando o método TNO, estimou-se valores de 79,31 KPa e 43,46 KPa referentes a sobrepressão gerada pela explosão do gás confinado, a 30 metros da fonte do vazamento, oriundos da ruptura e do 10 metros no caso do furo. O cálculo da vulnerabilidade permite maior e melhor compreensão sobre os cenários mais relevantes do HAZOP. O emprego do cálculo de vulnerabilidade para todos os desvios e cenários acidentais, sem passar pela análise prévia do HAZOP, seria extremamente demorado, custoso computacionalmente e geraria grande quantidade de dados. O sucesso da metodologia está exatamente na junção das duas técnicas.

# Índice

1.	Introdução.....	1
1.1	Processamento Primário .....	1
1.2	Sistema de Compressão de Gás .....	2
1.3	Gás Natural .....	3
1.4	Segurança em Plantas <i>Offshore</i> .....	4
1.5	HAZOP (Estudo de Perigo e Operabilidade).....	5
1.6	Estudo de Vulnerabilidade .....	5
1.7	Objetivos .....	5
1.8	Metodologia .....	5
2.	Introdução a Segurança de Processos .....	6
2.1.	Modelo de Fonte .....	6
2.2.	Análise de risco / HAZOP .....	8
2.2.1.	Conceitos Básicos.....	8
2.2.2.	Metodologia.....	8
2.2.3.	Planilha dos Resultados.....	12
3.	Análise de Vulnerabilidade .....	18
3.1.	Etapas da simulação .....	18
3.1.1.	Caracterização do Cenário de Acidente .....	18
3.1.2.	Caracterização do Local do Acidente .....	19
3.2.	Efeitos Físicos.....	20
3.2.1.	Explosão .....	20
3.2.2.	Incêndio em Poça.....	20
3.2.3.	Jato de Fogo .....	20
3.2.4.	BLEVE.....	20
3.3.	Modelos matemáticos utilizados .....	21
3.3.1.	Volume vazado .....	21
3.3.2.	Explosão de Nuvem de Vapor .....	22
3.3.2.1.	Modelo TNT Equivalente .....	23
3.3.2.2.	Modelo TNO Multi-Energia .....	26
4.	Estudo de caso .....	28
4.1.	Fluxograma e Descrição do Processo .....	28

<b>4.2. HAZOP</b> .....	31
<b>4.2.1. Escopo do estudo</b> .....	31
<b>4.2.2. Premissas</b> .....	31
<b>4.2.3. Resultados do HAZOP</b> .....	31
<b>4.2.4. ESTATÍSTICA DOS CENÁRIOS DO HAZOP</b> .....	38
<b>4.2.5. RECOMENDAÇÕES DO ESTUDO DE HAZOP</b> .....	38
<b>4.3. Análise de vulnerabilidade</b> .....	39
<b>5. Conclusão</b> .....	46
<b>Referencia bibliográfica:</b> .....	47

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Fluxograma do processamento primário de fluidos (THOMAS, 2004).....	2
Figura 1.2	Sistema de compressão de gás (Sistema em operação na Bacia de Campos) ....	3
Figura 2.1	Fluxograma para aplicação da metodologia durante as reuniões de HAZOP (PETROBRAS, 2005) .....	9
Figura 2.2	Planilha de HAZOP (CROWL e LOUVAR, 2002).....	12
Figura 2.3	Planilha de HAZOP (Adaptada de PETROBRAS, 2005) .....	13
Figura 2.4	Categoria de Frequência (Nolan, 2008) .....	14
Figura 2.5	Categoria de Severidade (PETROBRAS, 2005).....	15
Figura 2.6	Categoria de Severidade (Stolzer, Halford e Goglia, 2011) .....	15
Figura 2.7	Matriz de Riscos (Norma Técnica PETROBRAS N-2782).....	16
Figura 3.1	Gráfico de Sobrepressão Relativa ( $p_s$ ) por Distância Relativa ( $Z_e$ ) (CROWL e LOUVAR, 2002) .....	23
Figura 3.2	Modelo TNO Multi-energia para explosão em nuvem (AICHE/CCPS 1994).....	27
Figura 4.1	Sistema primário de compressão (Sistema em operação na Bacia de Campos)	30
Figura 4.2	Planilha de cálculo de volume vazado (Exemplo - Furo em linha de 4") .....	40
Figura 4.3	Planilha de cálculo de Sobrepressão, Modelo TNO (Exemplo - Furo em linha de 4").....	41
Figura 4.4	Pontos de Ruptura de Linha .....	42

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	<b>Tipos de Desvios associados com as Palavras Guia (PETROBRAS, 2005) .....</b>	<b>10</b>
<b>Tabela 2.2</b>	<b>Lista de Desvios para HAZOP de processos contínuos (PETROBRAS, 2005).....</b>	<b>11</b>
<b>Tabela 2.3</b>	<b>Categoria de Frequência (PETROBRAS, 2005) .....</b>	<b>14</b>
<b>Tabela 3.1</b>	<b>Dano estimado de sobrepessão em estruturas comuns (AIChE, 1994) .....</b>	<b>25</b>
<b>Tabela 4.1</b>	<b>Sistema analisado do HAZOP do Sistema de Compressão .....</b>	<b>31</b>
<b>Tabela 4.2</b>	<b>Planilha de HAZOP .....</b>	<b>32</b>
<b>Tabela 4.3</b>	<b>Matriz de Riscos .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 4.4</b>	<b>Recomendações do HAZOP.....</b>	<b>39</b>
<b>Tabela 4.5</b>	<b>Resultados da simulação por rompimento em tubulação.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabela 4.6</b>	<b>Resultados da simulação por furo em tubulação.....</b>	<b>45</b>

## **1. Introdução**

Os grandes acidentes de origem tecnológica envolvendo plantas químicas ocorridos nas décadas de 70 e 80 motivaram diversos órgãos governamentais, associações de classe e representantes da população em geral a promover inúmeros programas para o gerenciamento dos riscos impostos por atividades industriais.

O crescimento da indústria é fortemente dependente do avanço tecnológico. Na indústria química isso se reflete em processos mais complexos: pressões maiores, produtos químicos mais reativos, etc. Processos mais complexos requerem uma tecnologia de segurança mais complexa. Engenheiros necessitam de um entendimento mais detalhado e fundamental no que tange à segurança.

Assim, as técnicas para a identificação de perigos tornaram-se mais desenvolvidas. As estimativas dos efeitos no homem decorrentes de incêndios, explosões e liberações de substâncias tóxicas no meio ambiente foram gradativamente aperfeiçoadas e passaram a ser incorporadas no gerenciamento de riscos de atividades industriais, em geral, e em particular nas indústrias química e petroquímica.

As análises de grandes acidentes mostraram que em alguns casos a indústria não dispunha, na sua rotina diária de trabalho, de um serviço de segurança apoiado e prestigiado pela diretoria e, portanto, adequado para atuar, corrigir e sugerir medidas de prevenção nos diversos pequenos acidentes e incidentes que por vezes ocorriam. Isso devido ao fato de que a demanda por produtos estava muito alta e a produção precisava ser constante e ininterrupta. Essa pressão por produtividade, somada aos riscos de uma planta química, tendo em vista a inflamabilidade dos fluidos, pressões e vazões envolvidas, resultaram na ocorrência de eventos de alta severidade.

### **1.1 Processamento Primário**

O processamento primário de petróleo consiste na primeira etapa da fase de produção na qual o petróleo passa após sair do reservatório e alcançar a superfície. Normalmente, tem-se a produção simultânea de gás, óleo e água, juntamente com impurezas (BRASIL, ARAÚJO e SOUZA, 2011). O principal interesse econômico é a produção de hidrocarbonetos (óleo e gás), sendo necessário dotar os campos marítimos e terrestres de instalações destinadas a efetuar a separação do óleo, do gás e da água. O processamento primário de petróleo tem como objetivo (BRASIL, ARAÚJO e SOUZA, 2011):

- Tratar a fase oleosa para redução da água emulsionada e dos sais dissolvidos.
- Tratar a fase gasosa para redução do teor de água, e se necessário de outros contaminantes.
- Tratar a fase aquosa para descarte e/ou reinjeção nos poços produtores.

Dependendo do tipo de fluido produzido e da viabilidade técnico-econômica, uma planta de processamento primário pode ser simples ou complexa. As mais simples efetuam apenas a separação gás/óleo/água, enquanto que as mais complexas incluem o condicionamento e

compressão do gás, tratamento e estabilização do óleo e tratamento da água para reinjeção ou descarte (THOMAS, 2004).

A Figura 1.1 apresenta um esquema com as principais etapas do processamento primário de petróleo. No término do processamento primário, têm-se os fluxos separados de óleo e gás, além do descarte da água produzida.

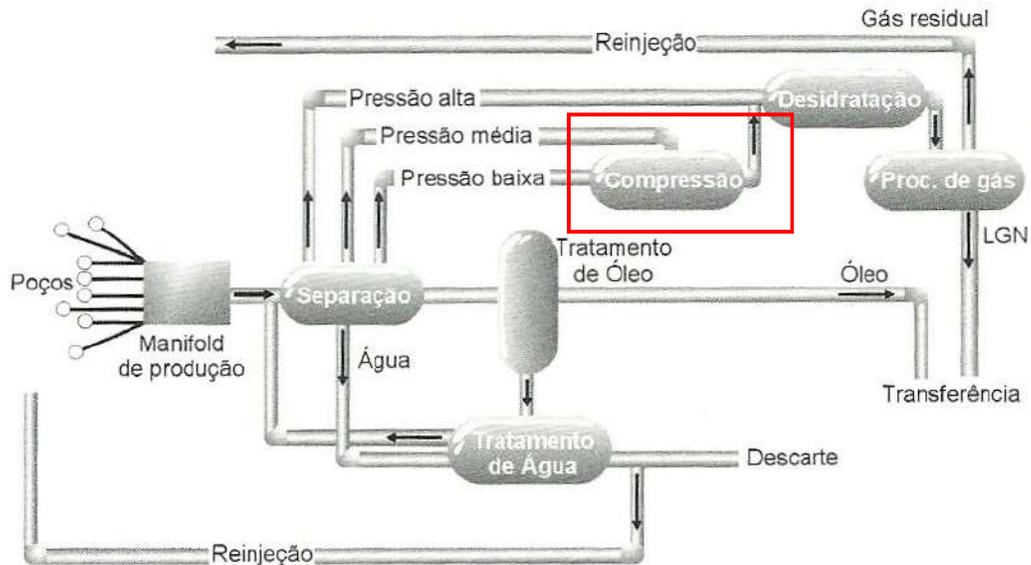


Figura 1.1 -- Fluxograma do processamento primário de fluidos (THOMAS, 2004)

O presente trabalho é focado no sistema de compressão de gás, marcado na Figura 1.1, de uma unidade de produção *offshore*.

## 1.2 Sistema de Compressão de Gás

Segundo Campbell (2004), compressores podem ser classificados em duas categorias:

- Deslocamento positivo: esse tipo de compressor inclui os modelos alternativos, parafuso rotatório, palhetas de correr, anel líquido e lóbulos rotativos. O princípio de compressão é o deslocamento volumétrico – reduzir o volume de gás aumenta a pressão.
- Cinético ou Dinâmico: esse tipo de compressor inclui os modelos centrífugo e o axial. O princípio de compressão é o de aceleração e desaceleração do gás – energia cinética é convertida em aumento de pressão.

Compressores alternativos e centrífugos são os mais usados em aplicações de exploração e produção de petróleo. Por outro lado, compressores de parafuso rotatórios estão aumentando em popularidade quando se objetiva um aumento baixo ou moderado de pressão em sistemas de refrigeração e compressão de gás combustível para turbinas. Já os compressores de lóbulos rotativos e de palhetas são usados principalmente em serviços especializados. Eles podem ser úteis nos casos em que a pressão de descarga não exceda 200 kPa (30 psig) e a vazão não é muito grande. Ambos possuem características favoráveis de peso e vibração. São muito usados

em serviços de recuperação de vapor, coleta de gases a baixa pressão e unidades de desidratação cíclica de leito sólido (Campbell, 2004).

Na Figura 1.2 está apresentado o sistema completo de uma unidade de compressão de gás. Neste trabalho foi estudada a primeira etapa do sistema apresentado, como está destacado. Na primeira etapa, têm-se duas unidades de compressão funcionando com capacidade de 50%, ou seja, uma fica sempre em modo *stand by*. Cada unidade possui dois compressores alternativos movidos por um motor elétrico. O primeiro compressor é alimentado com gases mais pesados e a baixa pressão oriundos do Separador Eletrostático, que chegam com uma pressão de entrada de 10 psig e são comprimidos até 68 psig. O gás comprimido é resfriado, e a essa corrente é feita a alimentação com os gases oriundos do Separador IP (pressão intermediária). O segundo compressor recebe essa corrente de gás a 68 psig, e a comprime até uma pressão de 157 psig. Para maximizar a recuperação de condensado nos vasos depuradores, é feita uma cascata com a corrente de líquido do último ao primeiro desses vasos, onde então o condensado é bombeado de volta ao Separador IP.

O sistema será melhor detalhado no capítulo 4, item 4.1 – Fluxograma e Descrição do processo.

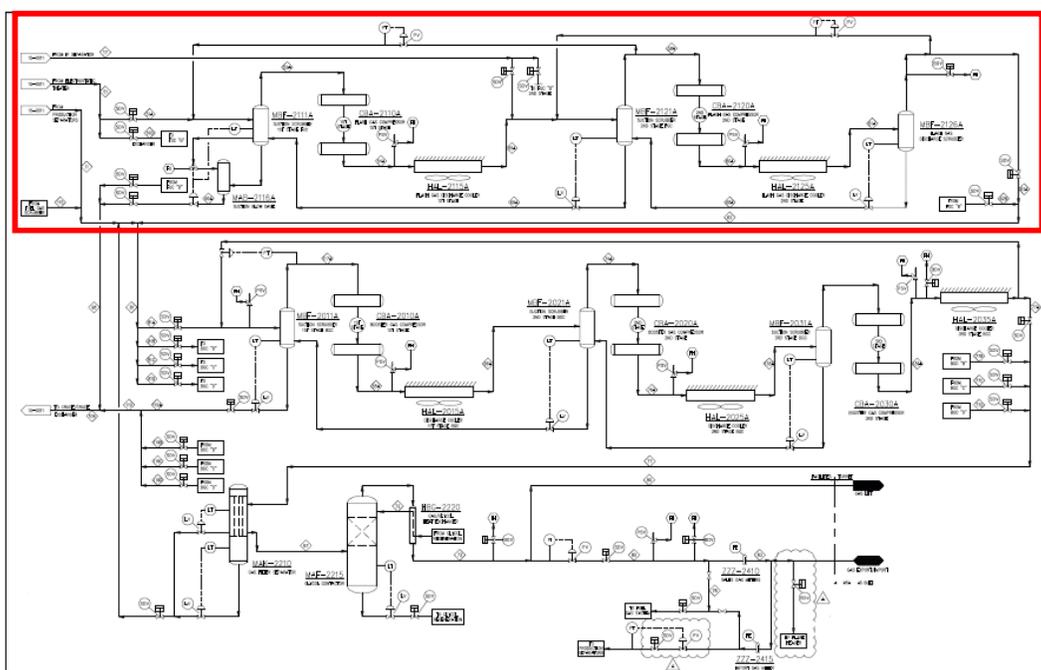


Figura 1.2 – Sistema de compressão de gás (Sistema em operação na Bacia de Campos)

### 1.3 Gás Natural

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos cuja composição abrange desde o metano ( $\text{CH}_4$ ) ao hexano ( $\text{C}_6\text{H}_{14}$ ), sendo o metano o principal componente. Apresenta também pequenas quantidades de componentes diluentes, como o nitrogênio e o vapor d'água, e contaminantes (gás sulfídrico e dióxido de carbono). O gás natural é mais leve que o ar (densidade relativa 0,6). Não apresenta odor e a sua combustão fornece de 8.000 a 10.000 kcal/m<sup>3</sup>. Ocorre na natureza em solução no óleo ou no estado livre (THOMAS, 2004).

O condicionamento, ou tratamento, é o conjunto de processos que compreende a compressão, remoção de contaminantes como CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e mercúrio, e desidratação, para ser utilizado principalmente como gás combustível e *gas-lift* nos poços de produção, sendo o excedente exportado através de gasoduto. Parte do gás produzido pode ser recirculado como *gas-lift*, sendo injetado na base da coluna de produção para garantia do escoamento, e parte, intitulada gás combustível, é consumida pela própria planta.

O gás combustível é usado na plataforma essencialmente para acionamento dos turbogeradores, dos turbocompressores e/ou geração de energia elétrica. Também é usado para pressurização do sistema de água quente, nos flutuadores do sistema de tratamento de água produzida, no sistema de regeneração do trietilenoglicol (TEG) e para o piloto e purga do sistema de tocha (alívio da planta) (VAZ, 2009).

#### **1.4 Segurança em Plantas *Offshore***

O histórico de acidentes em plataformas *offshore* de exploração e produção de petróleo mostra inúmeras fatalidades e imensos danos ambientais e financeiros. O acidente na plataforma *Piper Alpha* foi o maior já ocorrido em instalações *offshore*. Situada a mais de 200 km da costa do Mar do Norte, era operada pela *Occidental Petroleum* e pela *Texaco*. No dia 6 de julho de 1988 um procedimento inapropriado de manutenção causou um vazamento de condensado de gás natural que originou uma forte explosão. Os danos causados por esta primeira explosão geraram incêndios secundários que romperam tubulações de transporte de gás. Isto causou uma segunda explosão que envolveu toda a plataforma. De 226 funcionários da plataforma, 165 faleceram (PATÉ-CORNELL, 1993).

Segundo Kletz (1993), estudos comprovam que, tratando-se de prevenção de acidentes, o grande erro está em não extrair dos pequenos acidentes ou incidentes as lições necessárias para evitar uma grande tragédia.

Atualmente é clara a necessidade de investir na segurança e no gerenciamento dos riscos envolvidos no setor *offshore*. A inflamabilidade dos fluidos, as elevadas pressões e vazões envolvidas, são algumas das causas possíveis de eventos de alta severidade. Estes eventos podem, por exemplo, ser iniciados por liberações atmosféricas de gás inflamável devido a vazamentos na plataforma e/ou em seus dutos vizinhos. Estes eventos apresentam potenciais de risco que devem ser previstos nas considerações de projeto da embarcação (VAZ, 2009).

Outro aspecto importante do gerenciamento de risco em instalações *offshore* é o isolamento geográfico, que dificulta ou mesmo impede a chegada de auxílio em tempo adequado. Este isolamento geográfico aliado à proximidade da tripulação com as possíveis situações de perigo acarretam atenções especiais na avaliação de risco.

## **1.5 HAZOP (Estudo de Perigo e Operabilidade)**

Conhecido de longa data nas indústrias de processamento, o HAZOP (HAZARD AND OPERABILITY STUDIES) é uma técnica baseada em um procedimento que gera perguntas de maneira estruturada e sistemática através do uso apropriado de um conjunto de palavras-guia aplicadas a pontos críticos do sistema em estudo (CROWL e LOUVAR, 2002). É uma técnica de análise qualitativa desenvolvida objetivando examinar o processo, identificando, avaliando e prevenindo possíveis desvios das condições operacionais de uma planta.

Dois conceitos merecem destaque nesta técnica. O primeiro refere-se aos “nós”, que são os pontos a serem investigados. Normalmente são os equipamentos de grande porte presentes numa instalação industrial, como vasos de pressão, bombas, compressores, etc. O segundo conceito refere-se às “palavras-guia”, que compreendem um grupo de palavras utilizadas para guiar o estudo. Essas palavras-guia, quando combinadas com os parâmetros do processo, evidenciam os “desvios operacionais” (AGUIAR, 2010).

De modo complementar ao HAZOP, a análise de risco também pode ser baseada em estudos de vulnerabilidade.

## **1.6 Estudo de Vulnerabilidade**

O estudo de vulnerabilidade é realizado por intermédio de modelos matemáticos para a previsão dos impactos danosos às pessoas, instalações e ao meio ambiente gerados pelos cenários acidentais detectados no HAZOP, por exemplo. O cálculo dos impactos é baseado em limites de tolerância estabelecidos através do parâmetro Probit para os efeitos de sobrepressão advinda de explosões, radiações térmicas decorrentes de incêndios e efeitos tóxicos advindos da exposição a substâncias químicas por um curto período de tempo (CETESB, 2003).

## **1.7 Objetivos**

O objetivo deste estudo é estabelecer o estágio de identificação, controle e gerenciamento dos principais cenários de acidente de processo através de um estudo de HAZOP, tomando-se como referência a integridade potencial dos principais mecanismos de controle destes cenários, ou seja, suas barreiras de proteção. Esta avaliação será baseada nos padrões de segurança de processo e critério de aceitabilidade de risco, bem como nas boas práticas de segurança em um sistema de compressão de gás. A partir daí, aplicar os cenários encontrados com risco moderado em uma planilha de cálculo de vulnerabilidade da instalação. Dessa forma entender os principais cenários e suas consequências, bem como seus mecanismos de controle, de modo a permitir a operação da planta em condições de risco aceitáveis. O foco é que a planilha elaborada seja de fácil uso para que cálculos de vulnerabilidade sejam feitos de forma rápida e confiável.

## **1.8 Metodologia**

A partir dos cenários analisados pela metodologia aplicada no HAZOP, foram identificados potenciais vazamentos de produtos para a atmosfera. Utilizando as condições operacionais do processo e modelos de fontes de dispersão, calcularam-se os volumes vazados. A quantidade vazada é então aplicada ao estudo de vulnerabilidade. A metodologia de Análise de Vulnerabilidade permite avaliar os alcances dos efeitos físicos obtidos nos eventos identificados utilizando o modelo matemático de TNO para cálculo da sobrepressão de explosão.

## 2. Introdução a Segurança de Processos

No passado, a palavra “segurança” costumava remeter à antiga estratégia de prevenção de acidentes através do uso de EPIs (Equipamentos de Proteção Individual), procedimentos de resposta para emergências, regras e regulamentos. Recentemente, este conceito foi ampliado para prevenção de perdas, identificação de perigos, avaliação, minimização e gerenciamento de riscos (CROWL E LOUVAR, 2002).

Segundo Crowl e Louvar (2002), “perigo” é definido como uma condição física ou química que apresenta potencial de causar danos às pessoas, propriedades ou meio ambiente. Por sua vez, “risco” é definido como uma medida de danos a seres humanos, instalações ou ao meio ambiente expresso em termos da probabilidade do incidente e da magnitude do dano ou da perda.

Com base nessa definição de risco, neste trabalho, foi aplicada a metodologia de HAZOP para analisar a probabilidade de ocorrer diferentes eventos potencialmente danosos à segurança de processos. O sistema de compressão de gás objeto de estudo deste trabalho foi extraído de um FPSO em operação na Bacia de Campos. As condições de operação, características do gás e as dimensões dos equipamentos usados também foram baseadas nas unidades operantes nessa região.

### 2.1. Modelo de Fonte

Muitos dos acidentes na indústria química são resultados de vazamentos de materiais tóxicos, inflamáveis e explosivos. Esses materiais são comumente armazenados e transportados em grandes quantidades em estado gasoso ou líquido, refrigerado ou sob pressão.

Segundo Crowl e Louvar (2002), acidentes começam com um incidente, muitas vezes relacionados a uma perda de contenção ou vazamento de algum material do processo. Esse material pode ter propriedades perigosas, tais como sua toxicologia e/ou inflamabilidade. Alguns incidentes típicos são a ruptura ou quebra de uma tubulação, formação de um orifício em um tanque ou tubo, reações químicas descontroladas ou um incêndio nas proximidades de um vaso do processo. Uma vez conhecido o cenário acidental, e caso este envolva liberação de material para o meio, modelos de fonte são selecionados para quantificar esta liberação. O modelo de fonte fornece a taxa de vazamento, a quantidade total vazada (ou tempo total de vazamento), e o estado físico do material.

Os modelos de fonte são elaborados a partir de equações empíricas e fundamentais que representam os processos físico-químicos que ocorrem durante o vazamento. Para plantas de processos reais vários modelos são necessários para descrever as possíveis liberações. Normalmente é necessário fazer algum aprimoramento ou modificação ao modelo original para adequá-lo a situações específicas. Os resultados obtidos são apenas estimativos, devido ao fato de que as propriedades físicas dos materiais vazados não são perfeitamente caracterizadas ou devido às propriedades do processo em si, que podem não ser completamente entendidas. Existindo incertezas, por medida de segurança, os parâmetros usados devem ser escolhidos de forma a maximizar a taxa e a quantidade do vazamento em uma abordagem prevencionista, dessa forma podem ser propostas salvaguardas que mitigariam o pior dos cenários.

Os vazamentos podem ocorrer de forma que o conteúdo seja liberado por uma abertura larga ou estreita. No caso de uma abertura grande, uma quantidade elevada de material é liberada em um curto espaço de tempo. No caso de uma abertura pequena, o material é liberado a uma taxa menor. Nessa situação, as condições de processo a montante do local do vazamento não são afetadas, podendo ser assumido que a pressão adiante permanece constante.

O estado físico do material também afeta o mecanismo de liberação. Para vazamentos em um tanque armazenando gases, uma ruptura resulta em um jato de gás. Para um vazamento do líquido armazenado num tanque, o resultado é um fluxo de escape líquido. Se um líquido é armazenado sob pressão acima do seu ponto de ebulição atmosférico, um vazamento irá resultar num fluxo de líquido parcialmente vaporizado.

Durante e depois do vazamento, o material, gás ou líquido, interage com o ambiente ao seu redor de um modo específico, que também depende das condições do processo. Essas interações podem ter um efeito direto no estado (termodinâmico) do material vazado. Esse pode formar uma poça, pode se dispersar na atmosfera ou num corpo aquoso, ou pode sofrer ignição imediatamente (TNO, 2005).

A força motriz do escoamento de um fluido para fora de seu recipiente é a diferença de pressão entre o local de armazenagem e o ambiente externo. Em geral, a taxa de escoamento do fluido e sua velocidade aumentam se a diferença de pressão aumenta. O fluxo de fluidos compressíveis, como gases e misturas líquido/vapor (duas fases), pode se tornar crítico. O chamado escoamento crítico (choked) é atingido quando a pressão do ambiente é baixa o bastante para que a velocidade do fluido atinja uma velocidade igual à velocidade do som nesse fluido. Essa é a máxima velocidade possível para o escoamento, chamado então de “escoamento sônico”.

As propriedades físicas do material, o processo e as condições de armazenamento, a forma como a liberação ocorre e as possíveis interações com o ambiente externo também são fatores que influenciam o vazamento.

Sendo assim, existem vários modelos básicos que são frequentemente usados. São esses:

- Fluxo de líquido através de um furo (aplicação em equipamento ou dutos);
- Fluxo de líquido através de um furo em um tanque (aplicação em tanques);
- Fluxo de líquido através de tubulações (aplicação para rompimento total de duto);
- Fluxo de vapor ou gás por um furo;
- Fluxo de vapor ou gás através de um tubo (aplicação para rompimento total de duto);
- *Flashing* de líquidos;
- Evaporação ou ebulição de líquido em piscinas (aplicação em poças);

Cada condição demanda modelagem específica, cujo detalhamento ultrapassa o escopo deste projeto. Crowl e Louvar (2002) apresentam a modelagem com detalhes.

## 2.2. Análise de risco / HAZOP

Segundo Crowl e Louvar (2002), a técnica de HAZOP é essencialmente um procedimento indutivo qualitativo, no qual uma equipe examina um processo, gerando perguntas sobre o mesmo, de maneira sistemática. As perguntas, embora sejam estimuladas por uma lista de palavras-guia, surgem naturalmente através da interação entre os membros da equipe multidisciplinar (especialidades de processo, operação, segurança, manutenção, etc.). Logo, essa técnica de identificação de perigos consiste, fundamentalmente, numa busca estruturada das causas de possíveis desvios em variáveis de processo em diferentes pontos do sistema (denominados “nós de estudo” ou simplesmente “nós”).

### 2.2.1. Conceitos Básicos

Antes de apresentar a metodologia da técnica é necessário definir alguns termos fundamentais utilizados durante a aplicação do HAZOP.

- Nós de estudo (Study Nodes): trechos específicos do processo analisado
- Desvios: distúrbios ou modificações nos parâmetros ou variáveis de processo, que são evidenciados pela aplicação sistemática das palavras-guia aos nós de estudo (ex.: mais pressão);
- Parâmetros de processo: variáveis ou parâmetros (vazão, pressão, temperatura, nível e etc.) cujos desvios serão avaliados durante a aplicação da metodologia;
- Palavras-guia ou Palavras-chave (Guide Words): são palavras utilizadas para qualificar os desvios da intenção de operação (maior, menor, etc).

### 2.2.2. Metodologia

Segundo a Norma Técnica PETROBRAS N-2782 – Técnicas aplicáveis à Análise de Riscos Industriais, 2005 (REV B), o HAZOP visa principalmente o enfoque dos problemas de segurança, buscando identificar os perigos que podem colocar em risco os operadores, os equipamentos da instalação ou causar danos ao meio ambiente.

O procedimento utilizado à execução do HAZOP pode ser sintetizado nos seguintes passos:

- Divide-se a unidade em sistemas a fim de facilitar a realização do HAZOP;
- Escolhem-se os pontos (nós) importantes para a análise do sistema a fim de facilitar a realização do HAZOP;
- Escolhe-se o nó inicial;
- Aplicam-se as palavras-guia associadas aos parâmetros de processo, gerando os desvios possíveis de ocorrer em cada nó;
- Levantam-se as causas e fatores contribuintes prováveis que podem provocar tais desvios;

- Procura-se avaliar quais são os efeitos dos desvios, sem considerar a atuação das salvaguardas existentes;
- Verifica-se a possibilidade de eliminar as causas dos desvios ou pelo menos minimizar ou mitigar os seus efeitos, através das salvaguardas existentes;
- Quando necessário se estabelecem recomendações para eliminar as causas dos desvios ou para minimizar/mitigar os seus efeitos;
- Escolhe-se o próximo nó, uma vez que já tenham sido utilizadas todas as palavras-guia e os parâmetros de processo no nó anterior;
- Reinicia-se o processo até que todos os nós estejam analisados pelo estudo.

A Figura 2.1 apresenta um fluxograma com as etapas de aplicação da metodologia durante as reuniões de HAZOP.

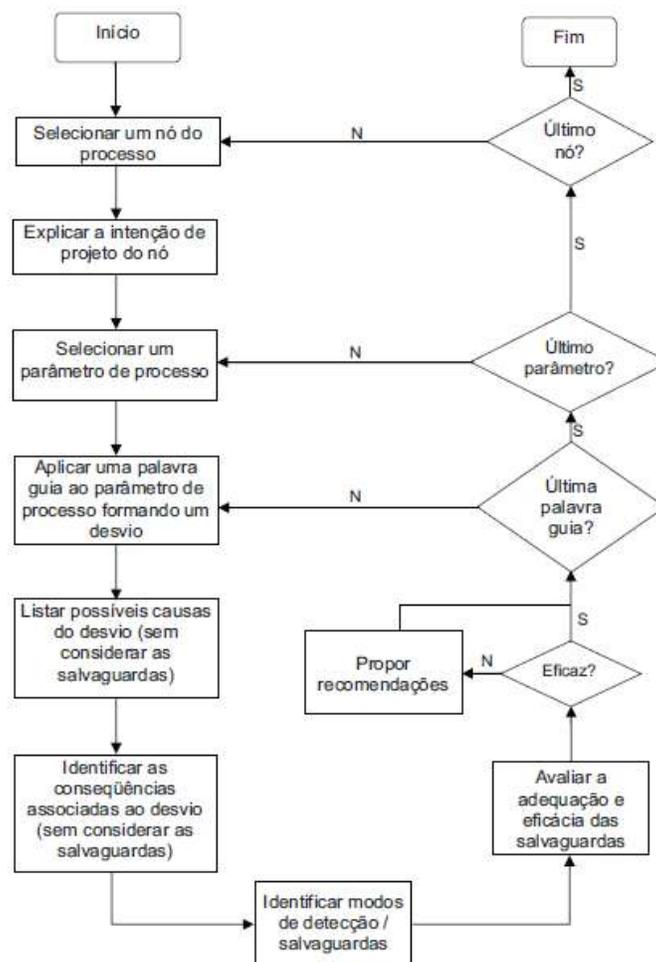


Figura 2.1 - Fluxograma para aplicação da metodologia durante as reuniões de HAZOP (PETROBRAS, 2005)

A Tabela 2.1 tem por objetivo exemplificar algumas palavras-guia, que são normalmente são associadas aos desvios considerados no HAZOP.

**Tabela 2.1 - Tipos de Desvios associados com as Palavras Guia (PETROBRAS, 2005)**

<b>Palavra-Guia</b>	<b>Desvios Considerados</b>
NÃO, NENHUM	Completa negação das intenções de projeto.
MENOR	Diminuição quantitativa de uma propriedade física relevante.
MAIOR	Aumento quantitativo de uma propriedade física relevante.
REVERSO	O oposto lógico da intenção de projeto
TAMBÉM	Um aumento qualitativo

A Tabela 2.2 apresenta uma lista de desvios para HAZOP de processos contínuos, resultante das associações dos parâmetros de processo com as respectivas palavras-guia.

**Tabela 2.2 - Lista de Desvios para HAZOP de processos contínuos (PETROBRAS, 2005)**

Parâmetro	Palavra-Guia	Desvio
FLUXO	Nenhum	Nenhum fluxo
	Menos	Menos Fluxo
	Mais	Mais Fluxo
	Reverso	Fluxo Reverso
	Também	Contaminação
PRESSÃO	Menos	Pressão Menor
	Mais	Pressão Maior
TEMPERATURA	Mais	Temperatura Alta
	Menos	Temperatura Baixa
NÍVEL	Menos	Nível Baixo
	Mais	Nível Alto
VISCOSIDADE	Mais	Viscosidade Alta
	Menos	Viscosidade Baixa
REAÇÃO	Nenhum	Nenhuma Reação
	Mais	Reação Descontrolada
	Menos	Reação Incompleta
	Reversa	Reação Reversa
	Também	Reação Secundária



Esta planilha contém nove colunas, as quais são preenchidas conforme a descrição apresentada.

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema				Nó:				
Preparado por:				Referência:				Data:
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/ Observações	#
								1
								2
								3
								4

Figura 2.3 – Planilha de HAZOP

### 1ª Coluna: Parâmetro

Essa coluna apresenta qual desvio que será analisado na respectiva linha.

### 2ª Coluna: Causas

A segunda coluna apresenta as causas e fatores contribuintes que podem acarretar ou colaborar para os desvios considerados na linha. Estas causas podem envolver tanto falhas intrínsecas de equipamentos (falhas da malha de controle, atuação indevida de válvulas, etc.), como erros humanos de operação e manutenção.

### 3ª Coluna: Efeitos

Esta coluna permite listar as possíveis consequências geradas a partir do desvio identificado. Podem ser considerados tanto distúrbios operacionais, como perda de produto e interrupção da transferência, como efeitos que possam gerar incêndios, explosões, ou lesões aos operadores e danos ao meio ambiente.

Na planilha utilizada nesse estudo, a categoria de efeito considerada no cenário analisado está em geral dividida em: Pessoas (segurança pessoal), ativos (prejuízo financeiro; danos às instalações), meio ambiente (impacto ambiental) e reputação (danos à imagem da empresa).

### 4ª Coluna: Salvaguardas

Nesta coluna são relacionados os recursos e sistemas disponíveis na instalação que permitem a detecção dos cenários acidentais e/ou mitigação dos potenciais efeitos ocasionados pelos desvios e causas identificadas.

### 5ª Coluna: Freq. (Categoria de Frequência)

A partir da definição de risco sabe-se que este é o produto da severidade pela frequência de ocorrência de um determinado cenário acidental.

Existem alguns modelos de classes de frequência explicitados na literatura. NOLAN (2008) apresenta um modelo que se baseia em eventos que ocorreram em algum momento da história da indústria, como apresentado na Figura 2.4.

Classe	Descrição
1	Frequência: nunca até 1 em 1.000.000 anos. Não ocorre na vida útil do processo e não existe relato ou suspeita de já ter ocorrido em algum instante, em algum lugar (em qualquer empresa do mesmo ramo).
2	Frequência: 1 em 1.000.000 anos até 1 em 10.000 anos. Eventos como esse são pouco prováveis de ocorrer, mas existe relato histórico de já ter ocorrido em algum instante, em algum lugar (em qualquer empresa do mesmo ramo).
3	Frequência: 1 em 10.000 anos até 1 em 1.000 anos. É possível de ocorrer em algum local (em qualquer empresa do mesmo ramo) durante a vida útil da planta.
4	Frequência: 1 em 1.000 anos até 1 em 100 anos. É quase certo de ocorrer em algum local da empresa durante a vida útil da planta (não necessariamente na planta em estudo).
5	Frequência: 1 em 100 anos ou mais. Já ocorreu em algum lugar da empresa, ou é provável de ocorrer na própria planta em estudo.

Figura 2.4 – Categoria de Frequência (Nolan, 2008)

Para estimar risco, os cenários acidentais foram classificados quanto às suas categorias de frequência, que fornecem uma indicação qualitativa da frequência esperada para a ocorrência com base no critério estabelecido pela Norma técnica da PETROBRAS N-2782 (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Categoria de Frequência (PETROBRAS, 2005)

Categoria		Descrição
A	<b>Extremamente Remota</b>	Conceitualmente possível, mas sem referência na indústria
B	<b>Remota</b>	Não esperado ocorrer, apesar de haver referências em instalações similares na indústria
C	<b>Pouco Provável</b>	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil de um conjunto de unidades similares.
D	<b>Provável</b>	Possível de ocorrer uma vez durante a vida útil da instalação
E	<b>Frequente</b>	Possível de ocorrer muitas vezes durante a vida útil da instalação.

### 6ª Coluna: Sev. (Categoria de Severidade)

De modo análogo, os cenários acidentais foram classificados quanto as suas categorias de severidade, as quais fornecem uma indicação qualitativa da severidade ou gravidade esperada

para a ocorrência de cada um dos cenários identificados. Foi utilizado como base o critério estabelecido pela Norma técnica PETROBRAS N-2782, 2005, conforme apresentado na Figura 2.5.

Categoria de Severidade		Descrição / características			
		Segurança pessoal	Patrimônio	Meio ambiente	Imagem
I	Desprezível	Sem lesões ou no máximo casos de primeiros socorros	Danos leves a equipamentos sem comprometimento da continuidade operacional	Danos insignificantes	Impacto insignificante
II	Marginal	Lesões leves	Danos leves a sistemas / equipamentos	Danos leves	Impacto local
III	Média	Lesões graves intramuros ou lesões leves extramuros	Danos moderados a sistemas	Danos moderados	Impacto regional
IV	Crítica	Fatalidade intramuros o lesões graves extramuros	Danos severos a sistemas (reparação lenta)	Danos severos com efeito localizado	Impacto nacional
V	Catastrófica	Múltiplas fatalidades intramuros o fatalidade extramuros	Danos catastróficos podendo levar à perda da instalação industrial	Danos severos e áreas sensíveis o se estendendo par outros locais	Impacto internacional

Figura 2.5 – Categoria de Severidade (PETROBRAS, 2005)

Stolzer, Halford e Goglia (2011) apresentam a severidade de uma maneira onde esta não é avaliada separadamente para em segurança pessoal, patrimônio, meio ambiente e imagem. Pode-se perceber através da figura 2.6, que as definições fazem um resumo de todas as consequências para um evento em um respectivo nível de severidade.

Nível de Severidade	Codificação	Definição
Catastrófico	5	Equipamento destruído, inúmeras mortes.
Perigoso	4	Grande redução das margens de segurança, sofrimento físico ou carga de trabalho de tal magnitude que os operadores não podem executar suas tarefas com precisão ou completamente. Ferimentos graves ou morte de certo número de pessoas. Danos ao equipamento.
Alto	3	Redução significativa das margens de segurança, redução na capacidade dos operadores de lidar com condições adversas de operação, como resultado de um aumento na carga de trabalho ou como resultado das condições que comprometem a sua eficiência. Incidente grave. Lesões corporais.
Baixo	2	Incômodo. Limitações de uso. Utilização de procedimentos de emergência. Incidente secundário.
Desprezível	1	Pequenas consequências.

Figura 2.6 – Categoria de Severidade (Stolzer, Halford e Goglia, 2011)

### 7ª Coluna: Risco (Categoria de Risco)

Esta coluna representa a combinação da categoria de frequência com a categoria de severidade, resultando na classificação do risco para cada cenário acidental. A matriz de risco utilizada como base para este estudo de HAZOP encontra-se estabelecida na N-2782 – Técnicas aplicáveis a Análise de Riscos Industriais (Rev. B), sendo apresentada na Figura 2.7.

		Categorias de frequência									
		Descrição / características				A	B	C	D	E	
		Pessoas	Patrimônio / continuidade operacional	Meio ambiente (ver Nota 1)	Imagem	Extremamente remota	Remota	Pouco provável	Possível	Frequente	
						Conceitualmente possível, mas sem referências na indústria	Não esperado ocorrer, apesar de haver referências em instalações similares na indústria	Pouco provável de ocorrer durante a vida útil de um conjunto de unidades similares	Possível de ocorrer uma vez durante a vida útil da instalação	Possível de ocorrer muitas vezes durante a vida útil da instalação	
Categorias de Severidade das Conseqüências	V	Catastrófica	Múltiplas fatalidades intramuros ou fatalidade extramuros (ver Nota 2)	Danos catastróficos podendo levar à perda da instalação industrial	Danos severos em áreas sensíveis ou se estendendo para outros locais	Impacto internacional	M	M	NT	NT	NT
	IV	Crítica	Fatalidade intramuros ou lesões graves extramuros (ver Nota 3)	Danos severos a sistemas (reparação lenta)	Danos severos com efeito localizado	Impacto nacional	T	M	M	NT	NT
	III	Média	Lesões graves intramuros ou lesões leves extramuros	Danos moderados a sistemas	Danos moderados	Impacto regional	T	T	M	M	NT
	II	Marginal	Lesões leves	Danos leves a sistemas / equipamentos	Danos leves	Impacto local	T	T	T	M	M
	I	Desprezível	Sem lesões ou no máximo casos de primeiros socorros	Danos leves a equipamentos sem comprometimento da continuidade operacional	Danos insignificantes	Impacto insignificante	T	T	T	T	M

Figura 2.7 Matriz de Risco (Norma Técnica PETROBRAS N-2782)

#### Legenda:

Categoria de risco	Descrição do nível de controle necessário
<b>Tolerável (T)</b>	Não há necessidade de medidas adicionais. A monitoração é necessária para assegurar que os controles sejam mantidos.
<b>Moderado (M)</b>	Controles adicionais devem ser avaliados com o objetivo de obter-se uma redução dos riscos e implementados aqueles considerados praticáveis (região ALARP - "As Low As Reasonably Practicable")
<b>Não Tolerável (NT)</b>	Os controles existentes são insuficientes. Métodos alternativos devem ser considerados para reduzir a probabilidade de ocorrência ou a severidade das conseqüências, de forma a trazer os riscos para regiões de menor magnitude de riscos (regiões ALARP ou tolerável).

**8ª Coluna: Recomendações/ Observações**

Essa coluna apresenta as Recomendações, Medidas Mitigadoras ou Observações pertinentes ao cenário de acidente em estudo. As medidas são identificadas por uma numeração sequencial.

**9ª Coluna: # (Numeração do Cenário)**

Esta coluna contém um número de identificação do cenário de acidente, sendo preenchida sequencialmente para facilitar a consulta a qualquer cenário de interesse.

Seguindo os parâmetros descritos neste capítulo, foram identificados os riscos moderados do sistema de compressão de gás analisado, e utilizaremos as condições de processo utilizadas para calcular a vulnerabilidade da unidade.

### 3. Análise de Vulnerabilidade

A extensão dos possíveis danos gerados em cada cenário acidental identificado no HAZOP é delimitada pela intensidade do efeito físico produzido. A relação entre a intensidade do efeito físico e o dano correspondente fica estabelecida por meio dos modelos de vulnerabilidade.

Para cenários de maior risco são realizadas simulações matemáticas dos efeitos dos acidentes, visando determinar a magnitude dos mesmos.

Para a avaliação da área vulnerável, a primeira etapa é a caracterização do cenário, que consiste na apresentação de todas as condições físicas e das hipóteses necessárias para a simulação, tais como a localização do vazamento no duto (ponto de liberação), o produto envolvido e as suas condições termodinâmicas no momento do vazamento.

#### 3.1. Etapas da simulação

Em termos gerais, a modelagem pode ser dividida nas etapas descritas a seguir:

##### 3.1.1. Caracterização do Cenário de Acidente

Esta etapa inclui:

- a) Determinação da substância a ser liberada:
  - Substância pura
  - Mistura: de acordo com a composição da corrente envolvida na análise.
- b) Determinação das condições do material liberado: temperatura e pressão em que o material a ser liberado encontra-se no reservatório (vaso, tanque, coluna, esfera) ou na linha. Utilizando as equações adequadas, é definido o estado:
  - Gás pressurizado: caso a temperatura escolhida esteja acima da temperatura de saturação para a pressão especificada
  - Líquido a pressão de vapor: a substância encontra-se em condições de saturação.
  - Líquido sobrepresurizado: quando a substância está líquida, mas a uma pressão superior à sua pressão de vapor.
- c) De acordo com Crowl e Louvar (2002), a partir da determinação do tipo de liberação é estabelecido o modelo mais adequado.

Os principais modelos utilizados são:

  - **Ruptura Catastrófica:** esse modelo considera a liberação instantânea de todo o inventário. Foi desenvolvido para modelagem de cenários onde se considera que o reservatório foi destruído por um impacto externo ou outro tipo de falha catastrófica que leve a um desenvolvimento muito rápido do acidente. A premissa adotada é que o

inventário liberado forma uma massa homogênea, expandindo-se rapidamente como uma nuvem semi-esférica.

- **Vazamento:** este modelo é empregado no caso de um pequeno furo em um reservatório (vaso, tanque, coluna, esfera) ou em uma tubulação de maior diâmetro (por exemplo, um furo de 1" em uma linha de 8" de diâmetro). Este modelo calcula a descarga através de um orifício perfeito, para o qual assume-se que não há perda de carga por fricção enquanto o fluido passa pelo furo.
- **Ruptura de Linha:** neste modelo é considerada a ruptura total da linha conectada a um reservatório com pressão (vaso, tanque, coluna, esfera). O diâmetro do furo é igual ao diâmetro da tubulação. O modelo de descarga calcula a queda de pressão ao longo da linha, baseando-se nos acidentes existentes (válvulas, flanges, conexões) e no comprimento da linha.
- **Abertura de Válvula de Alívio:** neste modelo é calculada primeiramente a descarga através do orifício da válvula de alívio, em seguida o fluxo de material através da linha de encaminhamento de produto para a atmosfera ("tailpipe"). Duas situações podem ser consideradas: sobrepressão no sistema (com descarga de material na fase vapor) e transbordamento ou aumento do nível de líquido (com liberação bifásica – líquido + vapor).

### 3.1.2. Caracterização do Local do Acidente

Segundo Crowl e Louvar (2002), esta etapa inclui:

- a) **Altura de Liberação:** é considerada a altura do local onde foi considerada a liberação de produto, seja uma linha de processo, uma tubulação, topo ou fundo de um reservatório, etc. É sempre considerada a altura com relação ao nível do solo.
- b) **Definição da presença de dique:** no caso da liberação ocorrer em um local onde haja algum tipo de contenção (dique) que limite o espalhamento do líquido liberado na descarga, isso precisa ser considerado. Caso não haja limite, o espalhamento do produto será calculado até a poça atingir uma espessura definida para cada tipo de solo.
- c) **Tipo de solo:** descreve o tipo de superfície na qual o material liberado irá se espalhar. Cada tipo de solo apresenta diferentes características para o espalhamento e evaporação, tais como: espessura mínima da poça, condutividade e difusividade térmica.
- d) **Direção do Vazamento:** determina-se a direção inicial do vazamento, sendo possível considerar-se a liberação como sendo: horizontal, vertical para cima, angular, vertical para baixo (colidindo com o solo).

## **3.2. Efeitos Físicos**

### **3.2.1. Explosão**

Trata-se de um processo onde ocorre uma rápida e violenta liberação de energia, associada a uma expansão de gases acarretando pico de sobrepressão.

A explosão de vapor confinado é o fenômeno causado pela combustão de uma mistura inflamável num ambiente fechado, com aumento na temperatura e na pressão internas. Esse tipo de explosão pode ocorrer com gases, vapores e pós. Neste caso, grande parte da energia manifesta-se na forma de ondas de choque (pressão). (CETESB, 2003)

### **3.2.2. Incêndio em Poça**

A liberação acidental de um líquido inflamável pode ocasionar a formação de poça, que seguida de ignição do material, dá lugar a formação de um incêndio em poça, com parte da energia liberada na combustão sendo emitida na forma de radiação térmica. (AIChE, 1994)

Existem vários modelos para a determinação da intensidade de radiação térmica para o meio ambiente a partir de um incêndio em poça. Um deles usa a premissa de que a superfície da chama é tomada como sendo um cilindro vertical reto, com diâmetro e altura definidos. Calcula-se, então, a quantidade de radiação emitida.

### **3.2.3. Jato de Fogo**

Quando da ocorrência de um vazamento de gás ou de um líquido pressurizado através de um orifício, haverá a formação de um jato. Se este entrar em contato com uma fonte de ignição próxima do vazamento, o fenômeno resultante é conhecido por jato de fogo. (AIChE, 1994).

### **3.2.4. BLEVE**

O **BLEVE** – *Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion* – ocorre quando um vaso que contenha um líquido com temperatura acima do seu ponto de ebulição se rompe. O BLEVE subsequente é a vaporização de grande parte do volume contido no vaso, possivelmente acompanhado de uma explosão ou combustão da nuvem vaporizada se esta for combustível. Esse tipo de explosão ocorre quando um incêndio externo aquece a parede do vaso com o material volátil. Enquanto o inventário do vaso aquece, a pressão de vapor do líquido aumenta e a integridade estrutural do vaso é reduzida. Se o vaso romper, o líquido aquecido volatiliza explosivamente. (Crowl e Louvar, 2002)

No caso estudado, podem existir cenários de liberação de gás natural através de furo ou rompimento de linha. A partir dessas liberações são avaliadas as explosões de nuvem gasosa em espaço confinado devido à alta criticidade desse evento.

### 3.3. Modelos matemáticos utilizados

#### 3.3.1. Volume vazado

A energia contida no gás ou vapor devido a sua pressão é convertida em energia cinética conforme esse gás ou vapor é liberado e se expande pelo orifício de vazamento. A densidade, pressão e temperatura mudam à medida que o material é liberado.

Usando uma premissa de que os vazamentos estudados são classificados como vazamentos de expansão livre, assume-se que o atrito entre o material vazado e a parede do orifício não é significativo (CROWL e LOUVAR, 2002). Assim grande parte da energia intrínseca ao gás comprimido é convertida em energia cinética. Nesse caso também é assumido um comportamento isentrópico.

Segundo Crowl e Louvar (2002), a equação (3.1) descreve o fluxo mássico de gás vazado por um orifício:

$$Q_m = C_o A P_o \sqrt{\frac{2g_c M}{R_g T_o} \frac{\gamma}{\gamma-1} \left[ \left(\frac{P}{P_o}\right)^{2/\gamma} - \left(\frac{P}{P_o}\right)^{(\gamma+1)/\gamma} \right]} \quad (3.1)$$

Onde:

- $C_o$  é o coeficiente de descarga;
- $A$  é área do orifício;
- $P_o$  é a pressão inicial do gás;
- $P$  é a pressão externa;
- $g_c$  é a constante gravitacional;
- $M$  é a massa molar do gás;
- $R_g$  é a constante dos gases ideais;
- $T_o$  é a temperatura absoluta de vazamento;
- $\gamma$  é a razão das capacidades caloríficas ( $C_p/C_v$ ) do gás;

Para o estudo de cenários acidentais é necessário determinar a máxima vazão de gás, que pode ser determinada fazendo a derivada parcial em  $P/P_o$  da equação (3.1) e igualando a zero.

A pressão choked ( $P_{choked}$ ) é a máxima pressão externa que resulta no fluxo máximo. Para pressões externas menores que  $P_{choked}$ , pode-se assumir que a velocidade de escoamento do fluido no orifício é a velocidade do som naquelas condições, e tanto essa velocidade quanto o fluxo máximo não podem ser aumentados reduzindo a pressão externa.

Calculamos a  $P_{choked}$  da seguinte forma:

$$\frac{P_{choked}}{P_o} = \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\gamma/(\gamma-1)} \quad (3.2)$$

Substituindo a equação (3.2) na (3.1), pode ser determinado o fluxo mássico máximo,  $(Q_m)_{choked}$ , pela equação resultante:

$$(Q_m)_{choked} = C_o A P_o \sqrt{\frac{\gamma g_c M}{R_g T_o} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{(\gamma+1)/(\gamma-1)}} \quad (3.3)$$

Crowl e Louvar (2002) detalham que para casos de escoamento sônico (*choked*), o coeficiente de descarga  $C_o$  aumenta conforme a pressão externa diminui. Para esses escoamentos e situações onde  $C_o$  é desconhecido, o valor conservador recomendado é 1,0.

A partir da equação 3.3 obtém-se a vazão mássica máxima do vazamento. Para obtenção do volume vazado é necessário multiplicar o valor encontrado pelo tempo de vazamento e dividir pela densidade do material vazado.

### 3.3.2. Explosão de Nuvem de Vapor

Quando uma grande quantidade de líquido vaporizado ou gás são rapidamente liberados no ambiente é formada uma nuvem de vapor que se dispersa no espaço ao redor do vazamento. Se essa nuvem sofrer ignição antes que seja diluída, um VCE (sigla para *Vapor Cloud Explosions*) pode ocorrer. A principal consequência de um VCE é a sobrepressão gerada.

AICHe/CCPS (1994) oferece um resumo do comportamento das nuvens de vapor. São descritas quatro características que devem estar presentes para que um VCE ocorra. Primeiro, o material liberado deve ser inflamável. Segundo, uma nuvem de tamanho suficiente deve se formar antes da ignição. Terceiro, uma porção razoável da nuvem deve ter concentração no interior da faixa de inflamabilidade. E por fim, deve haver confinamento suficiente ou uma mistura turbulenta de uma parte de nuvem para ocorrer um VCE.

AICHe/CCPS (1994) apresenta alguns exemplos em que VCEs são causados com quantidades relativamente pequenas de material inflamável, cerca de 100 kg, quando o material vazado é de uma espécie mais reativa como hidrogênio e acetileno. Outros pesquisadores reportaram explosões a partir de vazamentos e da ignição de aproximadamente 30 kg de hidrogênio.

Modelos de cálculo para Explosões em Nuvens de Vapor (VCE) já vêm sendo aplicados na análise de incidentes reais, como para o caso da explosão em Flixborough, e nas previsões de análise de risco (RIJNMOND PUBLIC AUTHORITY, 1982, apud AICHe/CCPS, 1994).

Para a realização deste projeto, os modelos de VCE estudados foram o TNT equivalente e TNO multi-energia. Ambos são modelos empíricos com base em dados de campo e em investigações de acidentes.

### 3.3.2.1. Modelo TNT Equivalente

O Modelo de TNT Equivalente é de fácil uso, estando descrito em AIChE/CCPS (1994).

Esse modelo é baseado na premissa de equivalência entre a explosão de hidrocarbonetos e de explosivo TNT. Ao se fazer uso deste modelo, assume-se que a explosão de um combustível tem comportamento semelhante àquela gerada por TNT de acordo com a equação (3.4).

$$W = \frac{\eta M E_c}{E_{TNT}} \quad (3.4)$$

Onde:

- **W** é a massa equivalente de TNT (kg ou lb)
- **$\eta$**  é eficiência empírica de explosão (sem unidade)
- **M** é a massa de hidrocarboneto (kg ou lb)
- **$E_c$**  é o calor de combustão do gás inflamável (kJ/kg ou Btu/lb)
- **$E_{TNT}$**  é o calor de combustão da TNT (4437 – 4765 kJ/kg ou 1943 – 2049 Btu/lb)

O efeito da explosão de uma carga de TNT é bem conhecido e documentado como é mostrado na Figura 3.1. É possível ver a relação da sobrepressão relativa ( $p_s$ ) gerada pela explosão com a distância relativa ( $Z_e$ ) alcançada pela onda de choque.

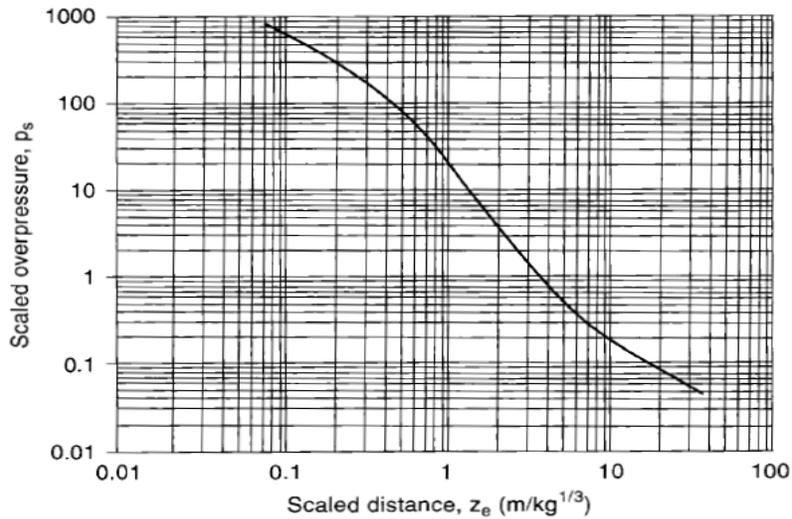


Figura 3.1 – Gráfico de Sobrepressão Relativa ( $p_s$ ) por Distância Relativa ( $Z_e$ ) (CROWL e LOUVAR, 2002)

A sobrepressão da explosão é correlacionada como uma função da distância relativa ( $Z_e$ ). Esse alcance é definido como a distância real até o centro da explosão ( $R$ ), dividida pela raiz cúbica da massa de TNT ( $W$ ).

$$Z_e = \frac{R}{W^{1/3}} \quad (3.5)$$

A sobrepressão real ( $p^0$ ) pode ser determinada pela equação (3.6).

$$p_s = \frac{p^0}{p_a} \quad (3.6)$$

Onde:

- $p_s$  é a sobrepressão relativa
- $p^0$  é a sobrepressão determinada (psia)
- $p_a$  é a pressão atmosférica (psia)

Sabendo o valor da sobrepressão ( $p^0$ ) gerada pela explosão, é possível avaliar e estimar os possíveis danos causados a estruturas localizadas a uma determinada distância (R) do centro da detonação.

A Tabela 3.1 mostra uma estimativa do efeito da sobrepressão em estruturas comuns.

Um problema na aplicação do modelo TNT equivalente é a utilização da eficiência da explosão ( $\eta$ ). A estimativa desse valor não é simples, e é calculada de maneiras diferentes por diversos autores. AIChE/CCPS (1994) estabelece que esse valor depende da reatividade do material vazado. Quanto mais reativo, maior a eficiência. Outro problema é que existe pouca relação entre a quantidade de energia de combustão envolvida em um VCE e a massa equivalente de TNT necessária para simular o efeito desse VCE. Isso é provado pelo fato de que, para nuvens, sem turbulência, tanto a escala quanto a força da explosão não estão relacionadas à quantidade de material inflamável presente. Esses fatores são determinados pelo tamanho e natureza das regiões parcialmente confinadas e obstruídas da nuvem.

**Tabela 3.1 – Dano estimado de sobrepressão em estruturas comuns (AIChE, 1994)**

Pressão		Dano
psig	kPa	
0,02	0,14	Ruído incômodo (137 dB se baixa frequência, 10-15 Hz)
0,03	0,21	Ocasional quebra de grandes janelas de vidro já sob tensão
0,04	0,28	Ruído alto (143 dB), <i>sonic boom</i> , pequenos danos a vidros
0,1	0,69	Quebra de pequenas janelas sob tensão
0,15	1,03	Pressão típica para a quebra de vidros
0,3	2,07	"Distância segura" (probabilidade de 0,95 de chance de não ocorrerem danos sérios abaixo desse valor); algum dano a telhados de casas; 10% das janelas de vidro se quebram
0,4	2,76	Limite para danos estruturais pequenos
0,5-1,0	3,4-6,9	Janelas grandes e pequenas normalmente se quebram; danos ocasionais nas esquadrias das janelas
0,7	4,8	Pequenos danos na estrutura de uma casa
1,0	6,9	Demolição parcial de casas
1,0-2,0	6,9-13,8	Quebra de amianto corrugado; aço corrugado ou painéis de alumínio, danos a fixadores, seguido de deformação; danos e arremesso de fixadores de painéis de madeira (casa padrão americana)
1,3	9,0	Leve distorção da estrutura de aço de edifícios
2,0	13,8	Colapso parcial de paredes e tetos de casas
2,0-3,0	13,8-20,7	Quebra de paredes de concreto ou de blocos de cimento
2,3	15,8	Limite inferior para a causa de sérios danos estruturais
2,5	17,2	Destruição parcial da alvenaria de casas (50%)
3,0	20,7	Máquinas pesadas (3000 lb) de edifícios industriais sofrem leves danos; vergalhões de construção distorcidos e arrancados de suas fundações.
3,0-4,0	20,7-27,6	Demolição de painéis de aço e ruptura de tanques de armazenamento de petróleo
4,0	27,6	Ruptura de revestimento de instalações industriais leves
5,0	34,5	Quebra de pilares de madeira
5,0-7,0	34,5-48,2	Destruição quase completa de casas
7,0	48,2	Tombamento de vagões de trem carregados
7,0-8,0	48,2-55,1	Painéis de tijolo, 8-12 centímetros de espessura, não reforçados, falham por cisalhamento ou flexão
9,0	62,0	Vagões de trem carregados completamente demolidas
10,0	68,9	Destruição total provável de edifícios; máquinas pesadas (até 7000 lb) ficam muito danificadas
300	2068	Limite de bordo de uma cratera

### 3.3.2.2. Modelo TNO Multi-Energia

Esse modelo é descrito em AIChE (1994). O método de multi-energia é uma modelagem conservadora, pois a detonação de uma nuvem de vapor não confinada é um evento poucas vezes observado na prática. A aplicação deste modelo em cenários onde a nuvem explosiva não está confinada é conservador, pois é mais provável que essa nuvem se disperse, e sua concentração fique fora dos limites de inflamabilidade, antes dela ter contato com uma fonte de ignição.

A base para esse modelo é que a energia da explosão é altamente dependente do grau de confinamento e menos dependente do tipo de combustível na nuvem. O procedimento da aplicação do Modelo de Multi-energia à explosão de uma nuvem de vapor segue as etapas abaixo (AIChE/CCPS, 1994):

- 1) Determinar a extensão da nuvem. Muitas vezes, esta etapa é feita desconsiderando a presença de equipamentos;
- 2) Identificar as áreas mais congestionadas;
- 3) Identificar possíveis fontes de ignição dentro das áreas confinadas coberta pela nuvem;
- 4) Estimar a energia da carga equivalente ar-combustível:
  - Considerar cada fonte de ignição separadamente;
  - Assumir que a quantidade total de combustível na mistura ar-combustível presente nas áreas confinadas/parcialmente confinadas contribui para a explosão;
  - Estimar o volume não disperso da mistura ar-combustível presente na área identificada como contendo a fonte da explosão;
  - Calcular a energia de combustão  $E$  (J) para cada explosão multiplicando o volume da mistura por  $3,5 * 10^6$  J/m<sup>3</sup>. Esse valor é típico para o calor de combustão de uma mistura estequiométrica ar-hidrocarboneto (HARRIS (1983) *apud* AIChE/CCPS (1994)).
- 5) Estimar a força de cada explosão. Algumas empresas criaram procedimentos específicos para isso, porém, muitos analistas fazem seus próprios julgamentos:
  - A estimativa mais conservadora e segura da força de uma explosão pode ser feita assumindo o valor representativo de 10 como sendo o valor máximo. Porém, a aplicação do valor 7 parece representar mais fielmente as experiências estudadas.
  - A explosão resultante das partes não confinadas ou não obstruídas da nuvem pode ser modelada assumindo uma baixa força inicial. Para as partes mais distantes da nuvem e as partes em repouso (sem turbulência no gás), assumir o valor mínimo de 1. Para as partes em turbulência de baixa intensidade, assumir a força de 3.

6) Uma vez calculada a energia de combustão  $E$  (J), estimada a distância  $R$ (m) da fonte de ignição em que se deseja saber a sobrepressão e utilizando a pressão ambiente  $P_0$  (Pa), calcula-se a distância escalar Sachs ( $\bar{R}$ ) através da Equação (3.7).

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/P_0)^{1/3}} \quad (3.7)$$

Com o valor de  $\bar{R}$ , com o auxílio da Figura 4.2, é possível correlacionar o valor da máxima sobrepressão Sachs ( $\Delta P_S$ ), utilizando a curva referente à força de explosão 7.

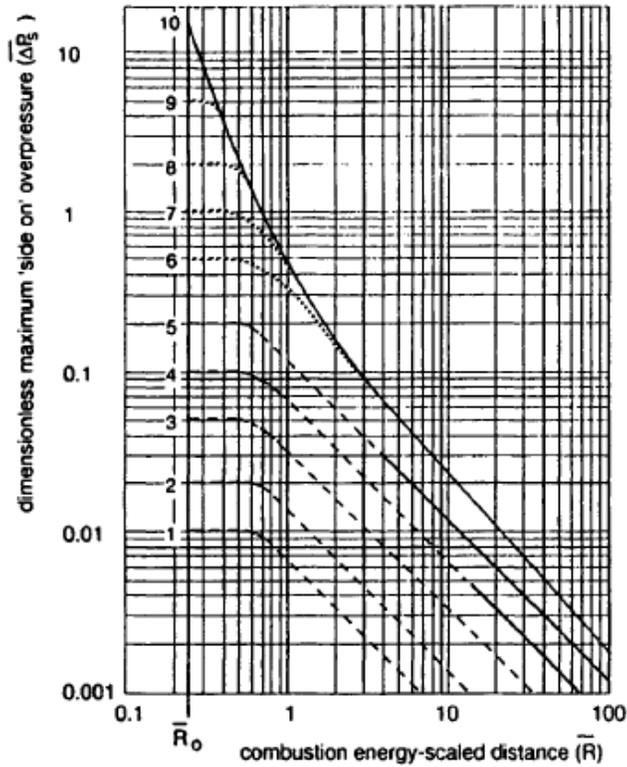


Figura 3.2 – Modelo TNO Multi-energia para explosão em nuvem (AIChE/CCPS 1994)

O valor da sobrepressão é, finalmente, calculado pela equação:

$$P_S = \Delta \bar{P}_S * P_0 \quad (3.8)$$

Onde:

- $P_S$  é a escala de sobrepressão (Pa)
- $P_0$  é a pressão atmosférica (Pa)
- $\Delta \bar{P}_S$  é a sobrepressão lateral de Sachs (adimensional)

Os efeitos da sobrepressão gerada podem ser observados na Tabela 3.1.

## 4. Estudo de caso

De acordo com a metodologia, o HAZOP é um procedimento qualitativo estruturado para identificar perigos de processos e potenciais problemas de operação associando, de forma sistemática, um conjunto de palavras-guia às variáveis de processo. Para cada desvio identificado são relacionadas suas causas, consequências, modos de detecção e salvaguardas existentes, recomendando medidas adicionais, quando necessário.

As etapas da aplicação da metodologia seguem a sistemática que foi apresentada no Capítulo 2. As palavras-guia aplicadas neste trabalho, assim como os parâmetros de processo aos quais elas podem estar relacionadas, foram descritos nas Tabelas 2.1 e 2.2.

### 4.1. Fluxograma e Descrição do Processo

As informações sobre o sistema de compressão utilizadas neste estudo foram coletadas de plataformas situadas na Bacia de Campos, não representando nenhuma especificamente, mas guardando características típicas das plataformas brasileiras.

Para o estudo do sistema de compressão em questão, foi assumido que o gás que alimenta esse sistema é oriundo de um sistema de separação que estaria funcionando perfeitamente e alimenta os compressores por duas correntes, sendo uma oriunda do Separador Eletrostático e outra oriunda do Separador IP (pressão intermediária).

O Sistema de Compressão é dividido em dois trens de compressão, o A e o B. O trem B fica em estado de *standby*, sendo utilizado somente em situações de extrema necessidade ou quando o trem A está fora de operação ou em manutenção.

A corrente de gás que alimenta o primeiro estágio de compressão do trem A, passando pela SDV 01 em uma tubulação de 6" de diâmetro, possui pressão de 10 psig e é oriunda do Separador Eletrostático. Ela passa pelo Scrubber de sucção do primeiro estágio, que remove partículas e gotículas que ainda podem estar presentes no gás, e reenvia o condensado formado para o trocador de calor cru/cru Sistema de Separação. O reciclo do condensado é feito por uma válvula que é controlada de acordo com o nível de condensado no Scrubber. O gás isento de partículas líquidas passa pelo Compressor 01 onde é comprimido até 68 psig, e em seguida é resfriado de 82 °C para 49 °C.

Nesse ponto (ao fim do resfriamento) termina o primeiro estágio de compressão. O gás resfriado segue em uma tubulação de 4" de diâmetro, e nela se tem a adição da corrente de gás oriunda do Separador IP. O segundo estágio de compressão também se inicia com o gás passando por um Scrubber de Sucção como o do primeiro estágio, a diferença entre eles é que desta vez o condensado formado retorna para o Scrubber do primeiro estágio antes de ser reciclado. Na corrente de saída de gás do segundo Scrubber existe uma linha de tubulação de segurança que recircula o gás para um ponto do processo anterior ao Scrubber do primeiro estágio. O fluxo nessa linha é controlado por uma válvula PV de acordo com a pressão de gás na alimentação do primeiro estágio de compressão. Caso esta pressão esteja abaixo do ideal, a válvula PV abre evitando danos de *surge* ao compressor. O compressor do segundo estágio comprime o gás que estava a 68 psig até uma pressão de 157 psig que passa por um outro

resfriador alterando sua temperatura de cerca 80 °C para cerca de 49 °C. Após ser resfriado, o gás segue por uma linha de 4" de diâmetro até um último Scrubber de Descarga para eliminar ainda mais partículas líquidas residuais presentes antes de ser encaminhado para o Sistema de Compressão de Reforço e posteriormente para o sistema de tratamento e direcionado para uso, armazenamento ou ao gasoduto.

A Figura 4.1 representa o sistema descrito.

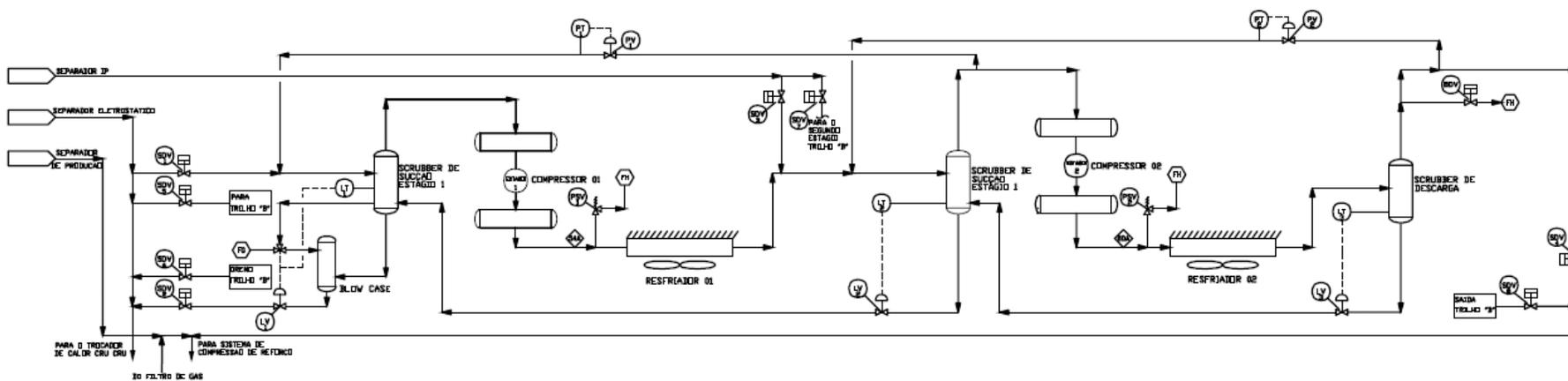


Figura 4.1 Sistema primário de compressão (Sistema em operação na Bacia de Campos)

## 4.2. HAZOP

### 4.2.1. Escopo do estudo

O estudo de HAZOP analisou o Sistema de Compressão de uma unidade de exportação de gás natural. Foi analisado um nó, como apresentado na Tabela 4.1 e ilustrado na Figura 4.1.

Tabela 4.1 – Sistema analisado do HAZOP do Sistema de Compressão

Nó	Descrição
1	Primeiro estágio do sistema de compressão de gás natural

### 4.2.2. Premissas

Foram adotadas as seguintes premissas para o estudo:

1. Não foram considerados os desvios cuja causa seja resultado da ocorrência de eventos simultâneos, ou seja, de mais de uma falha simultânea;
2. Somente foram consideradas as causas mencionadas na premissa 1 quando a Equipe de HAZOP, em comum acordo, assim achar necessário;
3. Foram feitas recomendações relacionadas à implantação de projetos, ou proposição de melhorias em procedimentos operacionais ou em planos de inspeção e de manutenção em equipamentos etc.
4. Foi adotada a sistemática de avaliação de causas no cenário e consequências no sistema.

### 4.2.3. Resultados do HAZOP

No estudo de HAZOP foi analisado um nó. As planilhas de HAZOP preenchidas durante as reuniões encontram-se apresentadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/Observações	#
Sem Fluxo	- SDV falha fechada - Falha no controlador da SDV	<u>Pessoas</u> Sem efeitos <u>Ativos:</u> Danos ao compressor <u>Meio Ambiente:</u> Sem Efeitos <u>Reputação:</u> Sem efeitos	- Alarmes de alta pressão  - Correntes de reciclo  - PSVs	C	II	B		1
	- Controle de nível do Scruber falha e mantém a válvula fechada - Falha na LV de descarga do Scruber - Falha na SDV de descarga do Scruber	<u>Pessoas</u> Sem efeitos <u>Ativos:</u> Entrada de líquido no compressor <u>Meio Ambiente:</u> Sem Efeitos <u>Reputação:</u> Sem efeitos	- Alarmes de alta pressão dentro do Scruber  - Alarmes de nível  - Dreno  - PSV para o Flare	C	II	B		2

SDV – Shut Down Valve: Válvula responsável por interromper o processo em caso de alguma identificação de risco.

LV – Level Valve: Válvula controladora de nível

PSV – Pression Security Valve: Válvula responsável por aliviar a pressão

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP (Contiuação)

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/Observações	#
	-Parada no compressor (perda de potência, pás desalinhada, vazamento de óleo lubrificante do compressor)	<u>Pessoas:</u> Sem efeitos <u>Ativos:</u> - Danos na estrutura do compressor - Aumento da pressão no Scruber <u>Meio Ambiente:</u> Sem efeitos <u>Reputação:</u> Sem efeitos	- Manutenção programada do compressor  - Alarmes de pressão no Scruber - PSV	C	II	B		3
	- Ruptura de linha	<u>Pessoas:</u> - Potencial risco às pessoas devido à liberação de HC <u>Ativos:</u> Sem efeito <u>Meio Ambiente:</u> - Liberação de gás para o meio ambiente <u>Reputação:</u> Impacto leve devido aos ferimentos das pessoas	-Detectores de gás  - Shutdown	C	IV	M	R1)Deve haver um plano de inspeção eficiente nas tubulações do sistema de compressão devido à alta pressão utilizada e as condições ambientes marinhas mais severas.	4
Fluxo Baixo	-Falha da Válvula de reciclo - Falha do Controlador da válvula de reciclo - Falha da SDV da linha vinda do separador eletrostático - Falhada SDV vinda do separador I/P - Obstrução nos capilares(Impureza, corrosão) - Vazamento pelos capilares	<u>Pessoas:</u> Sem efeitos <u>Ativos:</u> Danos no compressor <u>Meio Ambiente:</u> Sem efeitos <u>Reputação:</u> Sem efeitos	-Operadores qualificados -Alarmes de baixa pressão	C	II	B		5

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP (Continuação)

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/Observações	#
Fluxo Alto	Não relevante para segurança de processo							6
Fluxo Reverso	Linha de compressão A em stand by e linha de compressão B operando  - SDV 4 falha aberta vindo do sistema de gás  -SDV 4 falha aberta	<u>Pessoas:</u> -No caso de manutenção nos equipamentos em stand by pode causar ferimentos às pessoas <u>Ativos:</u> -Danos ao compressor <u>Meio Ambiente:</u> Sem efeitos <u>Reputação:</u> Sem efeitos	-Permissão de trabalho  -Válvula de retenção	<b>B</b>	<b>III</b>	<b>B</b>		7

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP (Continuação)

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
<i>Parâmetro</i>	<i>Causas</i>	<i>Efeitos</i>	<i>Salvaguardas</i>	<i>Freq</i>	<i>Sev</i>	<i>Risco</i>	<i>Recomendações/Observações</i>	<i>#</i>
Pressão Menor	Analisado em Fluxo Menor							8
Pressão Maior	Analisado em Sem Fluxo							10
Temperatura Menor	Sem efeitos para segurança de processo							11

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP (Continuação)

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/Observações	#
Temperatura Maior	-Falha nos resfriadores  -Entupimento na tubulação dos resfriadores (diminuindo a área de troca de calor)	<u>Pessoas:</u> Sem Efeitos <u>Ativos:</u> Alta temperatura no segundo estágio <u>Meio Ambiente:</u> Sem Efeitos <u>Reputação:</u> Sem Efeitos	-Alarmes de alta temperatura	<b>C</b>	<b>I</b>	<b>B</b>		12
Sem Nível / Nível Menor	-LV do Scruber ou do blow case falha aberta  -PSV falha aberta para a linha do Flare alta pressão  - Falha de operação da válvula de dreno deixando-a aberta	<u>Pessoas:</u> Sem Efeitos <u>Ativos:</u> Gás escapa pelo sistema de dreno Potencial sobrepressão no sistema de dreno <u>Meio Ambiente:</u> Utilização do Flare para queima do gás vindo do tanque de dreno <u>Reputação:</u> Sem Efeitos	-Alarmes de nível baixo no Scruber  -Sensores de nível no blow case	<b>D</b>	<b>I</b>	<b>B</b>		13
Nível Maior	Analisado no Fluxo Nenhum							14
Composição	Sem efeitos para a segurança de processos							15

Tabela 4.2 – Planilha de HAZOP (Continuação)

Estudo de Perigos e Operabilidade (HAZOP)								
Sistema: Compressão de gás		Nó: Primeiro estágio do sistema de compressão de Gás Natural						
Equipe:		Referencia:					Data:	
Parâmetro	Causas	Efeitos	Salvaguardas	Freq	Sev	Risco	Recomendações/Observações	#
Reação	Não aplicável para a segurança de processo							16
Contaminação	H <sub>2</sub> S acima dos limites definidos dos equipamentos, vindo do sistema anterior	<u>Pessoas:</u> Ferimentos potenciais às pessoas em caso de vazamento <u>Ativos:</u> Corrosão de equipamentos e linhas <u>Meio Ambiente:</u> Vazamento de hidrocarbonetos para a atmosfera <u>Reputação:</u> Impacto leve devido aos ferimentos das pessoas	-Rotina de amostragem para teste de concentração de H <sub>2</sub> S nos separadores primários e linhas de exportação de gás	D	III	M	R2) Concluir teste dos materiais envolvidos para determinar a concentração limite de H <sub>2</sub> S do processo	17

#### 4.2.4. ESTATÍSTICA DOS CENÁRIOS DO HAZOP

A matriz de risco correspondente à avaliação dos riscos com relação às pessoas, ao patrimônio, ao meio ambiente e à imagem da empresa, está apresentada na Tabela 4.3. Essa tabela apresenta a estatística dos cenários do HAZOP do Sistema de Separação da Unidade de Compressão de Gás Natural.

Tabela 4.3 – Matriz de Riscos

Matriz de Risco		Frequência					Total
		A	B	C	D	E	
Severidade	V	0	0	0	0	0	0
	IV	0	0	1	0	0	1
	III	0	1	0	1	0	2
	II	0	0	4	0	0	4
	I	0	0	1	1	0	2
Total		0	1	7	1	0	9

Com relação à avaliação do risco, dentre os 17 cenários analisados, foram identificados 7 (41%) cenários classificados na categoria de Risco Tolerável (região verde da matriz), 2 (12%) na categoria de Risco Moderado (região amarela da matriz) e nenhum cenário na categoria de Risco Não Tolerável (região vermelha da matriz). Os outros 8 cenários foram classificados como não aplicáveis para a segurança de processo ou já analisado em outro cenário.

#### 4.2.5. RECOMENDAÇÕES DO ESTUDO DE HAZOP

Durante o estudo do HAZOP foram analisados 17 cenários e foram propostas 2 recomendações pela equipe técnica. A lista de recomendações está apresentada na Tabela 4.4.

A última coluna das tabelas contém a identificação do número do cenário onde cada recomendação/observação foi originada.

**Tabela 4.4 – Recomendações do HAZOP**

<b>#</b>	<b>Descrição</b>	<b>Cenário Nº</b>
R1	Deve haver um plano de inspeção eficiente nas tubulações do sistema de compressão devido a alta pressão utilizada e as condições ambientes marinhas mais severas.	4
R2	Concluir teste dos materiais envolvidos para determinar a concentração limite de H <sub>2</sub> S do processo	17

### **4.3. Análise de vulnerabilidade**

Ao aplicar a metodologia de HAZOP para o sistema de compressão de gás natural, foi possível realizar uma abordagem crítica dos aspectos de segurança relativos ao processo. A partir da técnica qualitativa, foram selecionamos dois cenários de risco moderado para avaliar, quantitativamente, quais as potenciais consequências.

A análise quantitativa foi feita com o apoio da planilha em Excel desenvolvida com as equações e modelos matemáticos expostos no Capítulo 3. A figura 4.2 mostra como foi feito o cálculo do volume vazado através do cenário de furo em tubulação e, consecutivamente, a figura 4.3 explicita o cálculo da sobrepressão, pelo método TNO, gerada pela explosão do volume da nuvem confinada. É necessário indicar os dados específicos do produto vazado e das condições em que ocorreu o vazamento, marcados em cinza na primeira imagem, e posteriormente outros dados necessários e a distância de interesse, também em cinza, na segunda imagem.

Vazamento de gás de tubulação / tanque (Choked)						
Dados						
Gás		Gas Natural				
Razão de capacidade de calor ( $\gamma$ )		1,27				
Peso Molecular (M)		19,5				
Pressão Externa	14,7	psia				
	kgf/cm <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>	psia	psig		
Pressão interna REAL	11,03867	157,0063	171,706315	157		
P0 calculada	26,6686832	psia				
	<b>CHOKED</b>					
	m	ft	in	Gc		
Diâmetro do furo	0,01016	0,033332928	0,4	32,17		
Área do Furo	0,000872	ft <sup>2</sup>				
	kgf/cm <sup>2</sup>	kgf/m <sup>2</sup>	lbf/ft <sup>2</sup>	lbf/in <sup>2</sup>	psia	
Pressão interna do tanque	11,03867	110386,7	22607,2	156,8939	171,5939414	
P Choked	94,58401	psia				
C0	1					
	°C	°F	Rankine			
Temperatura interna	49	120,2	579,87			
Constante dos Gases Ideais (R)	1545	lbf/lbm-mol				
Resultados						
Vazão do vazamento	0,345296 lbm/s					
Tempo de vazamento	3	minutos	180	segundos		
				Densidade	Volume(m <sup>3</sup> )	
Quantidade vazada	62,15336	lbm	28,19276	kg	0,6	46,98794113

Figura 4.2 Planilha de cálculo de volume vazado (Exemplo – Furo em linha de 4")

Dados		
Calor de Combustão	3,5	MJ/m <sup>3</sup>
Distancia do Evento	260	m
Pressão Ambiente	101325	Pa
Velocidade do Som	344	m/s

**Colocar o volume para cada força de explosão abaixo**  
 (Usar 7 para explosão nominal e 10 para explosão máxima)

Força de Explosão	Volume (m <sup>3</sup> )
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0
7	23,49397
8	0
9	0
10	0
<b>Total</b>	<b>23,49397</b>

Resultados					
Força de Explosão	Energia Total (MJ)	Rbarrado	Sobrepessão	Sobrepessão Lateral (Kpa)	Sobrepessão Lateral (psi)
1	0				
2	0				
3	0				
4	0				
5	0				
6	0				
7	82,2289	27,8743	0,00766	0,7763	0,1126
8	0				
9	0				
10	0				
<b>Assumindo sobrepessões adicionais</b>				<b>0,78</b>	<b>0,11</b>

Figura 4.3 Planilha de cálculo de Sobrepessão, Modelo TNO (Exemplo – Furo em linha de 4’’)

#### Cenário 4

O cenário 4 é verificado junto ao desvio de “Fluxo Nenhum” no sistema, causado devido a uma ruptura de linha. Nesse cenário, pessoas e meio ambiente são afetados devido a liberação de hidrocarbonetos. Como salvaguardas são apresentadas detectores de gás e SDV's.

A classificação do risco foi definida como MODERADA gerando por uma frequência “C” e a severidade “Crítica” devido a um potencial de fatalidade intramuros.

Através da planilha de cálculo de vulnerabilidade montada com base na teoria e fórmulas apresentadas no capítulo 2, usadas para um estudo quantitativo, foi calculada a potencial massa de hidrocarbonetos vazada em um determinado tempo de evento. Como a plataforma de petróleo é um ambiente extremamente limitado, foi considerado que seria um espaço confinado e a sobressão gerada por uma explosão dessa massa vazada foi estimada.

Conforme detalhado na Figura 4.2, foram escolhidos dois pontos para o cálculo do vazamento em diferentes pressões do sistema de compressão do gás:

- Ponto A – Entre o primeiro e o segundo Scrubber.

Pressão de 68 psig, temperatura de 49°C e diâmetro de 4”; Coeficiente de Descarga  $C_0=1,0$ .

- Ponto B – Após o segundo Scrubber.

Pressão de 157 psig, temperatura de 49°C e diâmetro de 4”; Coeficiente de Descarga  $C_0=1,0$ .

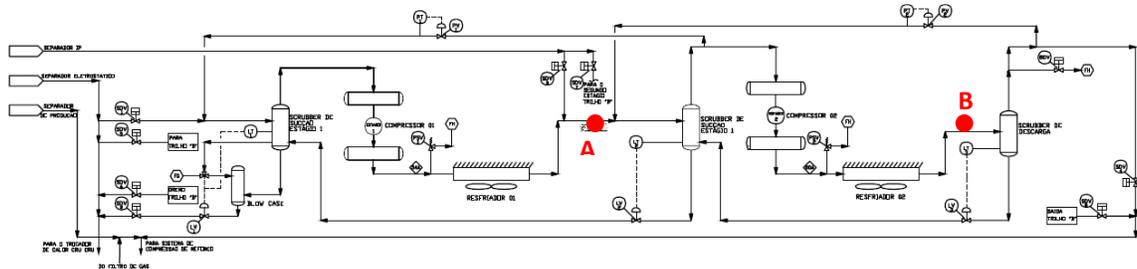


Figura 4.4 – Pontos de Ruptura de linha

Foram obtidos os seguintes resultados abaixo:

- Ponto A – Volume vazado de 2035,15 m<sup>3</sup>;
- Ponto B – Volume vazado de 4698,80 m<sup>3</sup>;

A partir dos volumes encontrados, foi calculada a sobrepressão pelo método TNO. Segundo AIChE/CCPS (1994), para o cálculo da sobrepressão, é adotado um tempo entre 1 a 5 minutos de vazamento até que haja a ignição. Para tempos superiores a esse intervalo, a nuvem se dispersa a concentrações fora dos limites de inflamabilidade. Foi utilizada a premissa de que nem toda a massa vazada entraria em ignição.

Parte dela pode se dispersar por ações naturais como vento ou ação dos ventiladores existentes no processo. Devido a esse fato assumimos que apenas metade do volume vazado ficaria confinado.

Portanto foram considerados:

- 3 minutos de vazamento;
- 50% de dispersão do volume vazado;
- Calor de combustão da mistura Gás Natural - Ar 3,5 MJ/m<sup>3</sup>.

A Tabela 4.5 apresenta os valores encontrados e uma estimativa de danos a estruturas comuns de acordo com *AICHE apud Clancey, 1972*:

**Tabela 4.5 – Resultados da simulação por rompimento em tubulação**

Ponto	Volume da nuvem (m <sup>3</sup> )	Distância (m)	Sobrepessão (KPa)	Danos
A	1017,57	30	55,13	Danos à painéis de tijolo
		100	9,66	Leve distorção da estrutura de aço de edifícios
		375	2,07	Distância segura
		500	1,51	Quebra de vidros
		1000	0,7	Quebra de pequenas janelas
B	2349,40	30	79,31	Destruição de edifícios e máquinas pesadas
		100	13,67	Colapso parcial de paredes e tetos de casas (padrão americano)
		495	2,07	Distância segura
		500	2,05	Dentro da distância segura
		1000	0,94	Quebra de vidros

### Cenário 17

No cenário 17 é estabelecida a presença de H<sub>2</sub>S, devido ao sistema de tratamento estar posicionado após a compressão do gás, acima dos limites dos equipamentos identificado no desvio de contaminação no sistema de compressão. Nesse cenário, pessoas e meio ambiente são afetados devido à liberação de hidrocarbonetos, porém em proporções menores devido à consideração de que podem se formar apenas pequenos furos nas tubulações. Nesse caso, estuda-se como consequência a corrosão das tubulações devido ao excesso de H<sub>2</sub>S, portanto não se enquadram como salvaguardas detectores de gás ou SDV, mas sim uma rotina de amostragem para teste de concentração de H<sub>2</sub>S nos separadores primários e linhas de exportação de gás natural.

A classificação do risco foi definida como MODERADA com registro ocorrência de mais de uma vez por ano gerando uma frequência “D” e a severidade “Média” devido a um potencial de lesões graves intramuros.

Foi adotado um furo de 0,4” (10% do diâmetro da linha) nos locais, condições e considerações descritos na simulação anterior.

Foram obtidos os seguintes resultados:

- Ponto A – Volume vazado de 20,35 m<sup>3</sup>;
- Ponto B – Volume vazado de 47 m<sup>3</sup>;

A partir dos volumes encontrados, foi calculada a sobrepressão pelo método TNO. Segundo AIChE/CCPS (1994), para o cálculo da sobrepressão, é adotado um tempo entre 1 a 5 minutos de vazamento até que haja a ignição. Para tempos superiores a esse intervalo, a nuvem se dispersa a concentrações fora dos limites de inflamabilidade. Foi utilizada a premissa de que nem toda a massa vazada entraria em ignição. Parte dela pode se dispersar por ações naturais como vento ou ação dos ventiladores existentes no processo. Devido a esse fato assumimos que apenas metade do volume vazado ficaria confinado.

Portanto foram considerados:

- 3 minutos de vazamento;
- 50% de dispersão do volume vazado;
- Calor de combustão da mistura Gás Natural - Ar 3,5 MJ/m<sup>3</sup>.

A Tabela 4.6 apresenta os valores encontrados e uma estimativa de danos a estruturas comuns de acordo com AIChE/CCPS (1994):

Tabela 4.6 – Resultados da simulação por furo em tubulação

Ponto	Volume da nuvem (m <sup>3</sup> )	Distância (m)	Sobrepessão (KPa)	Danos
A	10,17	10	27,64	Ruptura do revestimento de instalações industriais leves
		30	6,43	Demolição parcial de casas (padrão americano)
		50	3,58	Quebra de pequenas e grandes janelas com danos nas esquadrias
		80	2,09	Distância Segura
		100	1,63	Pressão típica de quebra de vidros
B	23,5	10	43,46	Destruição quase completa de casas (padrão americano)
		30	9,04	Leve distorção da estrutura de aço de edifícios
		50	4,93	Pequenos danos na estrutura de uma casa
		100	2,22	Limite para danos estruturais pequenos
		107	2,06	Distância segura

## 5. Conclusão

A realização concomitante das metodologias de HAZOP e Vulnerabilidade buscando contribuir e enriquecer a avaliação dos eventuais riscos de processo e os níveis de perigo mostrou-se uma abordagem prática, rápida e de uso simples para os cálculos de vulnerabilidade.

Estudos de risco de natureza qualitativa refletem a filosofia operacional e a experiência dos profissionais envolvidos, tendo como produto principal a identificação de oportunidades de melhoria e consequente desenvolvimento de uma lista de ações sugeridas (recomendações), que visam melhorar as condições de segurança das plantas analisadas. Portanto, a necessidade de profissionais competentes durante os estudos é de extrema importância devido a grande troca de informações e discussões. Apenas profissionais com atuação no campo podem acrescentar informações mais próximas da realidade operacional, de modo a estimar frequências de causa inicial mais exatas. Neste trabalho, foram utilizadas estimativas a partir de uma tabela padronizada e, portanto, passíveis de melhorias de uma avaliação particular do processo.

A metodologia de Vulnerabilidade tem uma contribuição principal de adicionar um viés quantitativo à análise de HAZOP, evidenciando potenciais danos aos quais a unidade está exposta.

Dentre os modelos estudados, TNT Equivalente e TNO Multi-Energia, apenas o modelo de Multi-Energia foi aplicado na planilha, pois este é mais preciso e melhor recomendado para os cálculos de sobrepressão. Outro fator pelo qual foi dada preferência ao modelo TNO é que este é dependente do Grau de Confinamento, ou Força da Explosão, que é um fator mais fácil de ser determinado por pessoas que conhecem a unidade em estudo do que a Eficiência da Explosão, fator o qual o modelo TNT Equivalente é dependente.

Existem métodos mais precisos para esse tipo de estudo, como o uso dos programas de CFD e do FLACS. Esses métodos não foram utilizados, pois o objetivo do trabalho era que a planilha gerada desse uma resposta confiável de forma rápida e fosse de fácil uso, não exigindo a elaboração de modelos em 3D, altos custos ou de grande capacidade de processamento.

No caso de um processo ainda em fase de projeto, a principal contribuição da metodologia de vulnerabilidade está na percepção dos alcances de determinados cenários de efeitos físicos como explosão, jato de fogo, incêndio em poça e BLEVE, possibilitando, dessa forma, que áreas críticas ou equipamentos vitais sejam protegidos de maneira eficiente, reavaliando o layout do processo.

Finalmente, através da utilização do modelo matemático proposto por AIChE/CCPS (1994), foi possível definir os alcances e a sobrepressão de uma possível explosão em nuvem confinada dos cenários de maior risco identificados no HAZOP. Como continuação deste estudo, sugere-se a busca de aplicações dos modelos matemáticos dos outros efeitos físicos possíveis de se obter no processo apresentado.

## Referencia bibliográfica:

AGUIAR, L. A. **Metodologias de análise de riscos APP & HAZOP**, 2011. Disponível em: <[http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/13179/material/APP\\_e\\_HAZOP.pdf](http://professor.ucg.br/SiteDocente/admin/arquivosUpload/13179/material/APP_e_HAZOP.pdf)>, 2014.

AICHe/CCPS, (*American Institute of Chemical Engineer / Center for Chemical Process Safet*), **Guidelines for Risk Based Process Safety**, 1994.

BRASIL, NILO ÍNDIO DO; ARAÚJO, MARIAL ADELINA SANTOS; SOUZA, ELIZABETH CRISTINA MOLINE DE, **Processamento de Petróleo e Gás**, 2011

CORNELL, M. ELISABETH PATC, **Learning from the Piper Alpha Accident: A Postmortem Analysis of Technical and Organizational Factors**, (Vol 13, Nº 2) 1993. Disponível em : <<http://engineeringfailures.org/files/Learning%20from%20the%20Piper%20Alpha%20Accident.pdf>>, 2014.

CROWL, D. A.; LOUVAR, J. F. **Chemical process safety: fundamentals with applications**, 2002.

DENNIO P NOLAN, *Safety and security review for the process industries*, 2008 (2Ed.)

KLETZ, TREVOR A, **Hazop--Past and Future**, 1997

LEES, F P, **Loss Prevention In The Process Industries**, (Vol 2), 1996

NORMA TÉCNICA CETESB P4.26, **Manual de orientação para a elaboração de estudos de análise de riscos**, (Rev. 1) 2003

NORMA TÉCNICA PETROBRAS, N-2782 – **Técnicas aplicáveis a Análise de Riscos Industriais**, (Rev. B) 2005

STOLZER, ALAN J; HALFORD, CARL D AND GOGLIA, JOHN J, **Implementing Safety Management Systems in Aviation**, 2011

THOMAS, JOSÉ EDUARDO, **Fundamentos de Engenharia do Petróleo**, 2004

TNO "Yellow Book", **Methods for the calculation of physical effects due to releases of hazardous materials (liquids and gases)**, 2005

VAZ, J.C. **Síntese de controle e análise de cenários em plantas offshore de óleo e gás**. Dissertação. (Pós-Graduação em Tecnologia de Processo Químicos e Bioquímicos). Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.