

UFRRJ

INSTITUTO DE TECNOLOGIA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA QUÍMICA**

DISSERTAÇÃO

**Análise Crítica das Camadas de Proteção
Exigidas pela NR 13 e sua Adequação para
Processos de Extração Supercrítica**

Vinícius Barroso Soares

2010



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA**

**ANÁLISE CRÍTICA DAS CAMADAS DE PROTEÇÃO EXIGIDAS
PELA NR 13 E SUA ADEQUAÇÃO PARA PROCESSOS DE
EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA**

VINÍCIUS BARROSO SOARES

Sob a orientação do professor
Gerson Luiz Vieira Coelho

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência**, no curso de Pós Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Processos de Separação e Termodinâmica Aplicada.

Seropédica, RJ
Setembro de 2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

VINÍCIUS BARROSO SOARES

Dissertação/Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Processos de Separação e Termodinâmica Aplicada.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 23/09/2010

Gerson Luiz Vieira Coelho. Dr. IT/DEQ/UFRRJ
(Orientador)

Marisa Fernandes Mendes. Dr. IT/DEQ/UFRRJ

Marco Antonio Gaya de Figueiredo. Dr. IQ/DOPI/UERJ

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a todas as pessoas que acreditaram nesta conquista. A minha mãe, pelo carinho, zelo e amor incondicional. Ao meu pai, por sempre destacar a importância do estudo em minha vida e por demonstrar infinita boa vontade em me ajudar. Ao meu irmão que, em muitas ocasiões, serviu-me de exemplo. A minha companheira pelo apoio, paciência e, principalmente, por sempre acreditar na minha capacidade. Aos meus amigos e colegas que compreenderam a minha ausência em determinados momentos. Enfim, a todas as pessoas que, de alguma maneira, contribuíram para que este trabalho fosse concretizado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, força criadora de todo o universo e fonte inesgotável de energia, por todos os acontecimentos em minha vida. À minha família, por ensinar-me que, por mais difícil que seja uma situação, nunca se deve desistir, pois somente assim os objetivos são alcançados. À minha companheira por todo o apoio, ajuda, paciência e compreensão demonstrada nos momentos de dificuldades que tive durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu orientador Gerson Luiz Vieira Coelho (UFRRJ), ao professor Marco Antonio Gaya de Figueiredo (UERJ) e aos engenheiros Renato Mendes e Vinícius Roberto, consultores técnicos de risco industrial, ambiental e de confiabilidade (PETROBRAS), que sempre se mostraram dispostos a ajudar com extremo desprendimento. A CAPES, pela bolsa de pesquisa concedida. À banca examinadora, pela leitura, correções e sugestões. Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da UFRRJ pela oportunidade e confiança. Aos colegas da turma de mestrado 2008, que experimentaram comigo momentos de angústia e vitória no curso de Pós-Graduação. A todos os professores, colegas e amigos que de alguma forma participaram de mais esta etapa concluída em minha vida.

“Alguém disse que não poderia ser feito e ele -
com uma risada - respondeu que aquilo talvez
não pudesse ser feito, mas que ele não diria isso
até que tivesse tentado”.

Edgard A. Guest

RESUMO

SOARES, Vinícius Barroso. **Análise Crítica das Camadas de Proteção Exigidas pela NR 13 e sua Adequação para Processos de Extração Supercrítica.** 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Processos de Separação e Termodinâmica Aplicada). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

A tecnologia supercrítica é uma operação unitária que consiste na separação de componentes específicos de misturas, através do uso de fluidos em condições supercríticas. Uma característica típica deste processo é a utilização de elevadas pressões na etapa de extração, assim a presença de vasos de pressão também é marcante numa instalação deste porte. Vasos de pressão são equipamentos que confinam fluidos submetidos a um diferencial de pressão, sendo muito utilizados para extrair, separar, filtrar, condensar, aquecer e armazenar. No Brasil, a Norma Regulamentadora 13 é o instrumento estratégico de informação e esclarecimento para ser utilizado por aqueles que laboram para a prevenção de acidentes envolvendo vasos de pressão e caldeiras. Entretanto, mesmo seguindo este documento em sua plenitude, percebe-se que muitos acidentes envolvendo estes equipamentos ainda vem ocorrendo em plantas industriais, de tal forma que, quanto maior a pressão envolvida no equipamento, maiores serão danos em casos de acidentes. Diante disso, o presente trabalho busca comparar os preceitos da Norma NR 13, especificamente na parte que cabe aos vasos de pressão, com as camadas de proteção preconizadas pela técnica Análise das Camadas de Proteção – LOPA. Os resultados obtidos demonstraram que a Norma NR 13 fornece um bom nível de segurança, pois, através da leitura crítica, pode-se identificar cinco camadas de proteção em sua estrutura. Entretanto, quando se refere aos processos de extração supercrítica é necessário que se faça uma complementação desta Norma com outros documentos. Somente assim, as oito camadas de proteção preconizadas pela técnica LOPA são atendidas, aumentando de forma considerável o nível de segurança deste tipo de instalação industrial.

Palavras-chave: Extração Supercrítica. NR 13. LOPA.

ABSTRACT

SOARES, Vinícius Barroso. **Critical Analysis of Layers of Protection Required by the NR 13 and its Suitability for Supercritical Extraction.** 2010. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química, Processos de Separação e Termodinâmica Aplicada). Instituto de Tecnologia, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2010.

The supercritical technology is unit operation that uses fluids in supercritical conditions to separation specific components of mixtures. The characteristic of the supercritical technology is the use of high pressure in the extraction step; therefore the pressure vessel equipment is very important. The pressure vessel equipment is it that keeps the fluid inside under differential pressure, and normally is used to extract, separate, filter, condense, heat and store. In Brazil, the Rule NR-13 is the strategic document that provides the information about the safety of pressure vessel and boiler. However, its application does not ensure the total in an industrial plant that uses this equipment. Thus, the present study has as goal to compare the questions presents at Rule NR 13, specifically the part that deals with the pressure vessels, with the layers of protection recommended by the technique Layers of Protection Analysis - LOPA. The results showed to indicate that Rule NR 13 provides in its structure a good level of security, because involve the presence of five layers of protection. However, when the process is the supercritical extraction it is necessary other documents to complement the Rule NR 13. As the eight layers of protection recommended by LOPA technique are attended, the safety levels this type of industrial plant increase significantly.

Keywords: Supercritical Extraction. NR 13. LOPA.

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|--------|
| Tabela 1 – Propriedades específicas dos fluidos em diferentes estados | pg. 06 |
| Tabela 2 – Condições críticas de alguns solventes | pg. 10 |
| Tabela 3 – Aplicações da tecnologia supercrítica | pg. 13 |
| Tabela 4 – Perigos estruturais para o vaso extrator | pg. 26 |
| Tabela 5 – Efeitos de uma onda de choque ao ser humano | pg. 29 |
| Tabela 6 – Efeitos de uma onda de choque às instalações em geral | pg. 29 |
| Tabela 7 – Categoria de severidade dos perigos identificados | pg. 36 |
| Tabela 8 – Categoria de frequência de ocorrência dos cenários | pg. 37 |
| Tabela 9 – Exemplo de Matriz de Riscos | pg. 37 |
| Tabela 10 – Exemplo de planilha APP | pg. 39 |
| Tabela 11 – Tipos de desvios associados com as palavras-guia | pg. 40 |
| Tabela 12 – Exemplo de planilha HAZOP | pg. 42 |
| Tabela 13 – Preenchimento da planilha FMEA | pg. 50 |
| Tabela 14 – Exemplo para documentação e cálculos da técnica LOPA | pg. 55 |
| Tabela 15 – Comparação entre as técnicas de Análise de Riscos | pg. 57 |
| Tabela 16 – Problemas que dificultam a aplicação das técnicas qualitativas | pg. 58 |
| Tabela 17 – Problemas que dificultam a aplicação das técnicas qualitativas | pg. 59 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|--------|
| Figura 1 – Região supercrítica para uma substância pura | pg. 05 |
| Figura 2 – Dependência da densidade do CO ₂ com a pressão e a temperatura | pg. 07 |
| Figura 3 – Diagrama pressão/volume | pg. 08 |
| Figura 4 – Processo de extração supercrítica | pg. 09 |
| Figura 5 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Índia | pg. 14 |
| Figura 6 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Nova Zelândia | pg. 14 |
| Figura 7 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Coreia do Sul | pg. 15 |
| Figura 8 – Planta industrial de extração supercrítica situada em Taiwan | pg. 15 |
| Figura 9 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Espanha | pg. 16 |
| Figura 10 – Destruição da planta industrial da Nypro Ltda | pg. 18 |
| Figura 11 – Descontaminação em Seveso | pg. 19 |
| Figura 12 – Destruição da empresa PEMEX | pg. 20 |
| Figura 13 – Destruição da Vila Socó em Cubatão, São Paulo | pg. 21 |
| Figura 14 – Acidentes de processo ocorridos nas últimas décadas no mundo | pg. 22 |
| Figura 15 – Possibilidades de interação do risco | pg. 23 |
| Figura 16 – Exemplo de uma Análise de Árvore de Eventos | pg. 44 |
| Figura 17 – Fluxograma de uma Análise de Falhas | pg. 47 |
| Figura 18 – Exemplos de camadas de proteção | pg. 54 |
| Figura 19 – Indicação das camadas de proteção contidas na Norma NR 13 | pg. 64 |

NOMENCLATURA

AICHE. *American Institute of Chemical Engineering*

ALARA. *As Low as Reasonably Achievable*

ALARP. *As Low as Reasonably Possible*

API. *American Petroleum Institute*

APP. *Análise Preliminar de Perigos*

APR. *Análise Preliminar de Riscos*

ASME. *American Society Mechanical Engineers Standards*

CATIA. *Cadastro de Acidentes no Transporte, Indústria e Armazenamento*

CIPA. *Comissão Interna de Prevenção de Acidentes*

CLT. *Consolidação das Leis do Trabalho*

DRT. *Delegacia Regional do Trabalho*

EEMUA. *Engeneering Equipment and Materials User's Association*

ETA. *Event Tree Analysis*

F&EI. *Fires and Explosions Index*

FMEA. *Failure Mode and Effect Analysis*

FTA. *Fault Tree Analysis*

HAZOP. *Hazard and Operability Study*

ICI. *Imperial Chemical Industries*

IEC. *International Electrotechnical Commission*

IPL. *Independent Protection Layers*

ISA. *International Society of Automation*

LOPA. *Layers of Protection Analysis*

MHIDAS. *Major Hazard Incident Data Service*

MTE. Ministério do Trabalho e Emprego

NASA. *National Aeronautics and Space Administration*

NPR. *Risk Priority Number*

NR. Norma Regulamentadora

PF&D. *Process Flow Diagrams*

PFD. *Probability of Failure on Demand*

PHA. *Preliminary Hazard Analysis*

PI&D. *Piping and Instrumentation Diagrams*

PMTA. Pressão Máxima de Trabalho Admissível

PRV. *Pressure Relief Valve*

PSV. *Pressure Safety Valve*

SIL. *Safety Integrity Levels*

SIS. *Safety Instrumented System*

SONATA. *Summary of Notable Accident in Technical Activities*

TIC. Técnica de Incidentes Críticos

TLV-TWA. *Threshold Limit Values-Short Term Exposure Limit*

TLV-TWA. *Threshold Limit Values-Time Weighted Average*

SUMÁRIO

| | |
|---|--------|
| RESUMO | i |
| ABSTRACT | ii |
| LISTA DE FIGURAS | iii |
| LISTA DE TABELAS | iv |
| NOMENCLATURA | v |
| | |
| 1. INTRODUÇÃO | pg. 01 |
| 1.1. Contextualização da Pesquisa | pg. 01 |
| 1.2. Justificativa da Pesquisa | pg. 02 |
| 1.3. Objetivos da Pesquisa | pg. 04 |
| | |
| CAPÍTULO 2 | |
| EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA | pg. 05 |
| 2.1. Aspectos Físico-Químicos da Extração Supercrítica | pg. 05 |
| 2.2. Processo de Extração Supercrítica | pg. 08 |
| 2.3. Solventes em Estado Supercrítico | pg. 10 |
| 2.4. Vantagens da Extração Supercrítica | pg. 11 |
| 2.5. Aplicações e Perspectivas Futuras da Extração Supercrítica | pg. 12 |
| 2.6. Plantas Industriais de Extração Supercrítica | pg. 13 |
| | |
| CAPÍTULO 3 | |
| SEGURANÇA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS | pg. 16 |
| 3.1. Grandes Acidentes Industriais | pg. 16 |
| 3.2. Estudos de Análise de Riscos | pg. 22 |
| 3.3. Técnicas de Análise de Riscos | pg. 32 |

CAPÍTULO 4

| | |
|--|--------|
| ANÁLISE CRÍTICA DA NORMA NR 13 | pg. 56 |
| 4.1. Escolha da Técnica de Análise de Riscos | pg. 56 |
| 4.2. Identificação das Camadas de Proteção Preconizadas pela NR 13 | pg. 58 |
| 4.3. Discussão dos Resultados | pg. 59 |

CAPÍTULO 5

| | |
|---|--------|
| CONCLUSÕES E SUGESTÕES | pg. 65 |
| 5.1 Conclusões | pg. 65 |
| 5.2 Sugestões para os Trabalhos Futuros | pg. 68 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | pg. 69 |

ANEXO I

| | |
|--|--------|
| MANUAL TÉCNICO DE CALDEIRA E VASOS DE PRESSÃO | pg. 81 |
|--|--------|

ANEXO II

| | |
|--|---------|
| CAMPO DE APLICAÇÃO DA NR 13 | pg. 105 |
|--|---------|

ANEXO III

| | |
|--|---------|
| CLASSIFICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO | pg. 107 |
|--|---------|

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização da Pesquisa

A extração é uma operação unitária que, basicamente, consiste na separação de componentes específicos de misturas, sendo muito utilizada por indústrias de alimentos, química fina e petroquímica. Grande parte dos produtos químicos disponíveis no mercado são obtidos por este tipo de operação, de tal maneira que um método ideal de extração é aquele que ocorre de forma rápida, simples, eficiente, sem perdas ou degradação das substâncias, que produza uma amostra pronta para análise, sem gerar rejeitos químicos e que envolva um baixo custo, seja de implantação, operação ou de manutenção.

Os métodos tradicionais de extração tais como, a prensagem, a destilação e a extração com o uso de solventes orgânicos, frequentemente, apresentam problemas em alguns destes aspectos. Por exemplo, muitas vezes requerem alguns dias para fornecer resultados satisfatórios e resultam em extratos diluídos que, normalmente, são concentrados por evaporação do solvente que gera acúmulos de substâncias tóxicas ou emissão destas para a atmosfera, prejudicando a qualidade do meio ambiente e da saúde do trabalhador. Estas e outras limitações despertaram o interesse pela tecnologia supercrítica (PENEDO, 2007).

A extração supercrítica é uma operação unitária que consiste, basicamente, em uma etapa de solubilização, onde há o contato entre a matéria-prima e o solvente em condições supercríticas, e uma etapa de separação, na qual a condição supercrítica é desfeita por mudanças de temperatura e/ou pressão, permitindo a separação do solvente do material de interesse (MCHUGH & KRUKONIS, 1986).

Uma das grandes vantagens da extração supercrítica é extrair componentes de forma mais rápida, simples, com elevada eficiência, com baixa degradação das substâncias e permitir a substituição dos solventes orgânicos pelos “solventes-verdes”. Estima-se que 98% das extrações com fluidos em condições supercríticas o fazem utilizando esta substância (PASQUALI *et al.*, 2006). Isto pode ser explicado pelo fato do dióxido de carbono ser ambientalmente menos agressivo, relativamente barato, abundante na natureza, não inflamável, não tóxico, germicida, entre outras características.

Devido a estas características muitas aplicações envolvendo fluidos supercríticos são reportadas da literatura como, por exemplo, aplicações em micronização de partículas,

transformação de materiais, separações de frações do petróleo, liquefação do carvão, remediação de solos contaminados, formação de polímeros porosos, separação de soluções orgânicas, regeneração de carvão-ativo, aplicações farmacêuticas e no setor agroalimentício, etc (VELASCO *et al.*, 2007; MCHUGH & KRUKONIS, 1986).

De certo, nos últimos anos a tecnologia supercrítica, principalmente aquelas que utilizam dióxido de carbono, ampliou o seu espaço nos centros acadêmicos de pesquisas. Só para se ter uma ideia, durante o período de 1994 a 2003, o Brasil alcançou a marca dos 84% do total de artigos publicados no mundo referente à extração com uso de fluidos supercríticos (MEIRELES & ROSA, 2005). O setor industrial também acompanhou este avanço, entretanto ainda não se faz presente em nosso país uma planta industrial de extração supercrítica, muito embora esta não seja a realidade de outros países da Europa, Ásia e América do Norte.

Um dos motivos esta relacionado com a necessidade de se operar com materiais a elevadas pressões (MENDES, *et al.*, 2006), o que implica no aumento do custo de implantação, operação e periculosidade do processo. De tal maneira que, minimizar riscos numa planta de extração supercrítica é de fundamental importância, seja ela em escala laboratorial, piloto e, principalmente, industrial por envolver maior quantidade de materiais.

1.2. Justificativa da Pesquisa

Em uma instalação supercrítica, a presença de vasos de pressão é marcante. Estes equipamentos são caracterizados por armazenar fluidos submetidos a um diferencial de pressão e possuem funções variadas dentro do processo como, por exemplo, aquecer, condensar, filtrar, armazenar, separar, extrair, entre outras (ASME, 2005). Garantir a integridade física destes equipamentos é de fundamental importância, visto que grande parte dos acidentes que causam danos e vítimas nas indústrias são resultados da liberação repentina de materiais submetidos a altas pressões (PERRY *et al.*, 2008).

Recorda-se, por exemplo, o ocorrido em Repcelok, Hungria, onde nove pessoas morreram na explosão de um vaso de pressão contendo trinta e cinco toneladas de dióxido de carbono. Em Worms, Alemanha, três pessoas morreram após a explosão de um tanque contendo dióxido de carbono pressurizado. Em Santo Antônio, Texas, EUA, um vaso de pressão carregado com dez quilogramas de dióxido de carbono explodiu, deixando muitas pessoas feridas (ABBASI & ABBASI, 2007).

No Brasil, a Norma Regulamentadora 13 (NR 13) é o instrumento estratégico de informação e esclarecimento para ser utilizado por aqueles que laboram para a prevenção de acidentes envolvendo vasos de pressão e caldeiras (BRASIL, 2003). Esta Norma, trouxe muitos benefícios após a sua publicação, em 8 de junho de 1978, pois estabeleceram-se critérios mais rigorosos para o projeto, inspeção, manutenção e operação de vasos de pressão e caldeiras, tendo como objetivo principal a diminuição de acidentes envolvendo estes equipamentos (<http://www.mte.gov.br>, 2010).

Entretanto, mesmo seguindo este documento em sua plenitude, percebe-se que muitos acidentes envolvendo estes equipamentos ainda vem ocorrendo em plantas industriais, de tal forma que, quanto maior a pressão envolvida no equipamento, maiores serão danos em casos de acidentes. Para se ter uma ideia, de acordo com a Superintendência Regional do Trabalho e Emprego em Minas Gerais, apenas no ano de 2008 em Minas Gerais, dois acidentes envolvendo vasos de pressão vitimaram oito trabalhadores e deixaram duas pessoas gravemente feridas (<http://www.mte.gov.br>, 2010), sem mencionar os danos patrimoniais e o sentimento de medo gerado na sociedade e nos funcionários que afeta, diretamente, o orçamento e a imagem da empresa.

Diante deste fato, é fundamental analisar o nível de segurança fornecido pela Norma NR 13, a luz da tecnologia supercrítica. Uma abordagem que pode ser realizada é comparar os preceitos desta Norma com as camadas de proteção preconizadas pela técnica Análise de Camadas de Proteção – LOPA. Esta técnica, específica da área de Análise de Riscos, vem desempenhando um papel importante no cenário industrial, pois permite verificar se numa determinada instalação existem camadas de proteção suficientes para fazer frente a um cenário de risco específico.

A Análise de Riscos compreende todas as atividades que buscam situações, combinações de situações e estados de um sistema (projeto, equipamento, processo, serviço ou produto) que representam fontes potenciais de perigos. Através deste tipo de estudo é possível estabelecer maneiras corretas para realização das tarefas de forma que os atos inseguros, condições inseguras, acidentes, falhas, retrabalhos e desperdícios não ocorram num determinado sistema ou, pelo menos, tenham sua frequência e severidade reduzidas.

As técnicas de Análise de Riscos são classificadas em qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas, de acordo com os resultados fornecidos (SONNEMANS & KÖRVERS, 2005). Neste cenário, a técnica LOPA faz uma abordagem semi-quantitativa, pois é aplicada após uma análise qualitativa e realiza certa quantificação do cenário de risco sem, no entanto,

envolver a complexidade dos cálculos presente nas técnicas quantitativas (VASCONCELOS, 2008; ALVES, 2007). Esta característica intensificou a procura por este tipo de abordagem no setor industrial. Em 2006, cerca de 10% dos estudos de Análise de Risco realizado pelas indústrias correspondia a aplicação da técnica LOPA. Em 2007, este número passou para 25% e, em 2008, ultrapassou a marca dos 80% (BAUM *et al.*, 2009).

1.3. Objetivos da Pesquisa

O objetivo principal deste trabalho é identificar e analisar de forma crítica se os preceitos exigidos pela Norma NR 13 podem ser enquadrados como camadas de proteção, a luz das camadas de proteção preconizadas pela técnica LOPA. Para alcançar este objetivo, estabeleceram-se como objetivos específicos: (i) o entendimento do processo de extração supercrítica; (ii) a compreensão da importância da Segurança de Processos e, em particular, do processo de extração supercrítica; (iii) o esclarecimento de algumas técnicas de Análise de Riscos, especialmente da técnica LOPA; (iv) a identificação das camadas de proteção contidas na Norma NR 13 baseado na técnica LOPA.

Diante disso, o presente trabalho está dividido em cinco capítulos, além desta parte introdutória e dos anexos. No Capítulo 2 são abordados alguns aspectos físico-químicos da extração supercrítica. Buscou-se identificar as principais vantagens desta tecnologia, aplicações, perspectivas futuras, bem como a descrição de alguns equipamentos industriais. O Capítulo 3 é dedicado à Segurança de Processos. Nele destaca-se a importância do estudo de Análise de Riscos, frente à descrição de alguns acidentes industriais que causaram grandes tragédias e que poderiam ter sido evitados. Também está presente uma breve revisão das principais características de algumas técnicas específicas de Análise de Riscos com exemplo de aplicações para um fluxograma proposto de extração supercrítica. No Capítulo 4 há a descrição da metodologia utilizada neste trabalho para alcançar o objetivo principal, bem como a discussão dos resultados encontrados. As conclusões da pesquisa e algumas sugestões para os próximos trabalhos são abordadas no Capítulo 5. Por fim, os Anexos I, II e III abordam, em particular, a parte da Norma NR 13 referente aos vasos de pressão.

CAPÍTULO 2

EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA

O presente capítulo aborda os principais conceitos físico-químicos do processo de extração supercrítica, bem como as vantagens desta tecnologia, suas aplicações, perspectivas futuras e a descrição das condições operacionais e físicas de alguns equipamentos industriais.

2.1. Aspectos Físico-Químicos da Extração Supercrítica

Os fluidos homogêneos são divididos em líquidos e gases. Entretanto, existe um ponto acima do qual esta distinção nem sempre pode ser delimitada com nitidez. Este ponto é chamado de ponto crítico (PC) e suas referências no diagrama pressão *versus* temperatura são a pressão crítica (P_c) e a temperatura crítica (T_c), conforme pode ser visualizado na Figura 1. Diz-se que os fluidos acima dessas referências termodinâmicas (região hachurada) estão em condições supercríticas (CARLÈS, 2010).

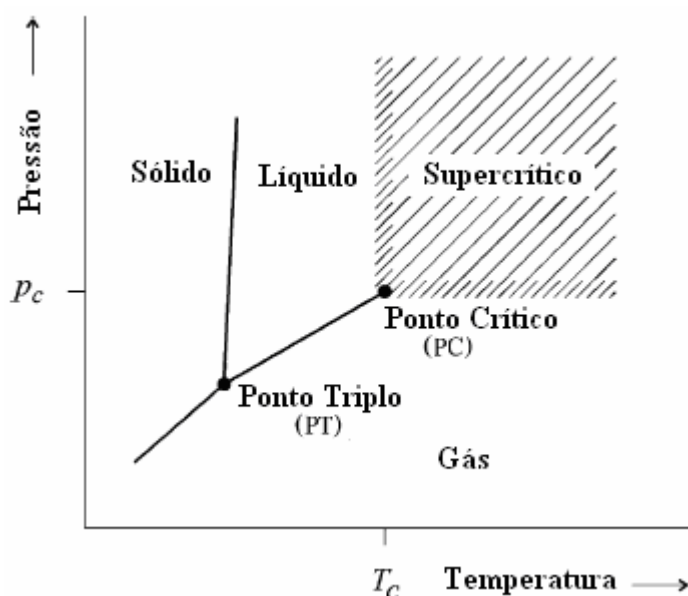


Figura 1 – Região supercrítica para uma substância pura (Fonte: BRUNNER, 2005).

As propriedades físico-químicas dos fluidos em condições supercríticas apresentam um valor intermediário entre as propriedades dos líquidos e dos gases. Neste sentido, diz-se

que a difusividade e a viscosidade do fluido em condições supercríticas são semelhantes às dos gases. Já a densidade aproxima-se muito com a dos líquidos (PENEDO, 2007), conforme pode ser constatado na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades específicas dos fluidos em diferentes estados

| Propriedade | Líquido | Supercrítico | Vapor |
|-----------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Viscosidade (Kg/m*s) | 0,2 - 3,0 | $5,0 \times 10^{-2}$ | $2,0 \times 10^{-2}$ |
| Difusividade (cm ² /s) | $1,0 \times 10^{-5}$ | $4,0 \times 10^{-2}$ | 0,1 - 0,4 |
| Densidade (g/cm ³) | 0,6 - 1,6 | 0,2 - 0,95 | $1,3 \times 10^{-3}$ |

Fonte: PENEDO (2007)

Esta característica, bastante peculiar dos fluidos em condições supercríticas, permite a eles um poder de solubilidade similar ao dos líquidos, mas com propriedades de transferência de massa semelhante a dos gases. Estas características são altamente influenciadas pela pressão e temperatura do processo (MCHUGH & KRUKONIS, 1986).

Em linhas gerais, pode-se dizer que o aumento de pressão, mantendo-se a temperatura constante, sempre eleva o poder de solvência do fluido e, conseqüentemente, sua densidade. Já o aumento de temperatura, mantendo-se a pressão constante, causa a diminuição da viscosidade do fluido que, aliada às características de difusividade e de tensão superficial, proporciona um aumento expressivo nas taxas de transferências de massa. Entretanto, quanto maior a temperatura menor a densidade do fluido, reduzindo o seu poder de solubilização (COELHO & PAWLISZYN, 2004). Isto sugere que é preciso buscar uma relação ótima entre estes dois parâmetros para que o processo ocorra com bons rendimentos.

A Figura 2 mostra claramente a dependência da densidade do dióxido de carbono em condições supercríticas de temperatura e pressão. Observe que mantendo a temperatura constante (por exemplo, a isoterma de 100°C), o aumento de pressão sempre é vantajoso ao processo de extração, pois aumenta a densidade do fluido. Por outro lado, para uma pressão constante (por exemplo, isobárica tracejada), o aumento da temperatura diminui a densidade do fluido.

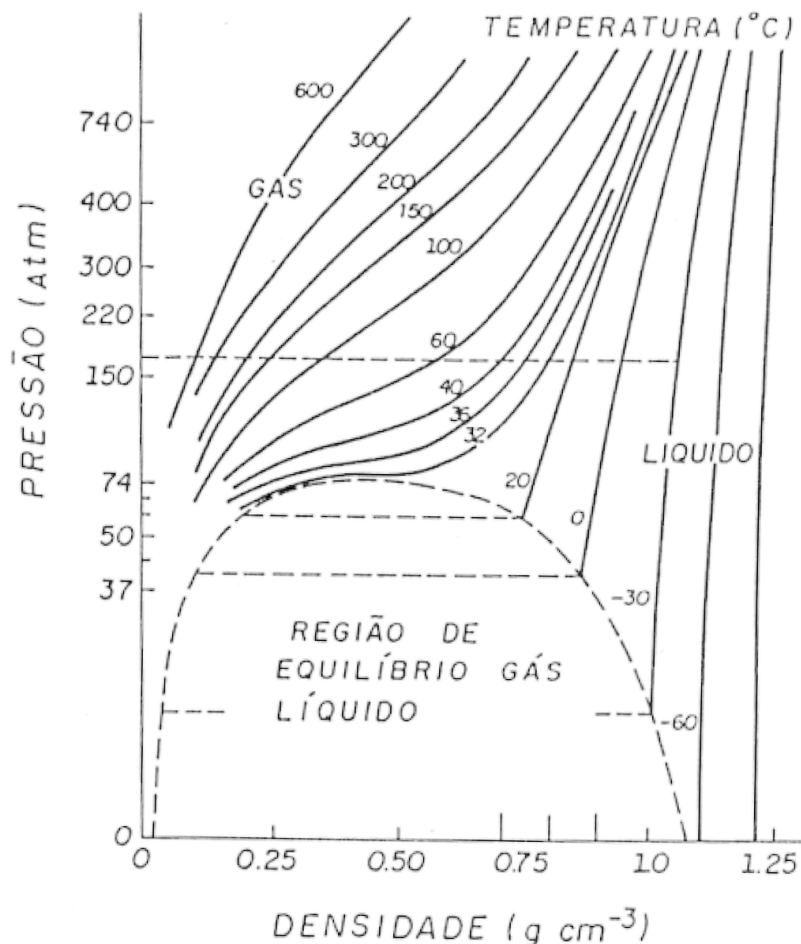


Figura 2 – Dependência da densidade do CO₂ com a pressão e a temperatura (Fonte: CARRILHO *et al.*, 2001)

Pequenas variações de pressão e/ou temperatura na região supercrítica podem levar a grandes variações da densidade do solvente supercrítico e, conseqüentemente, influir diretamente no seu poder de solubilização (MCHUGH & KRUKONIS, 1986).

Esta característica pode ser melhor compreendida pela Figura 3. Observe que abaixo do Ponto Crítico (PC), uma determinada variação de pressão ($P_2 - P_1$, em vermelho) provoca certa variação no volume do fluido ($V_2 - V_1$, em vermelho). Se esta mesma variação de pressão for mantida ($P_2 - P_1$, em azul), porém agora acima do Ponto Crítico (PC), a variação de volume é bem menor ($V_2 - V_1$, em azul). Em outras palavras, na região supercrítica é possível obter grande variação na densidade do fluido com pequenas variações de pressão e, quanto maior a densidade do fluido, maior o seu poder de solvência.

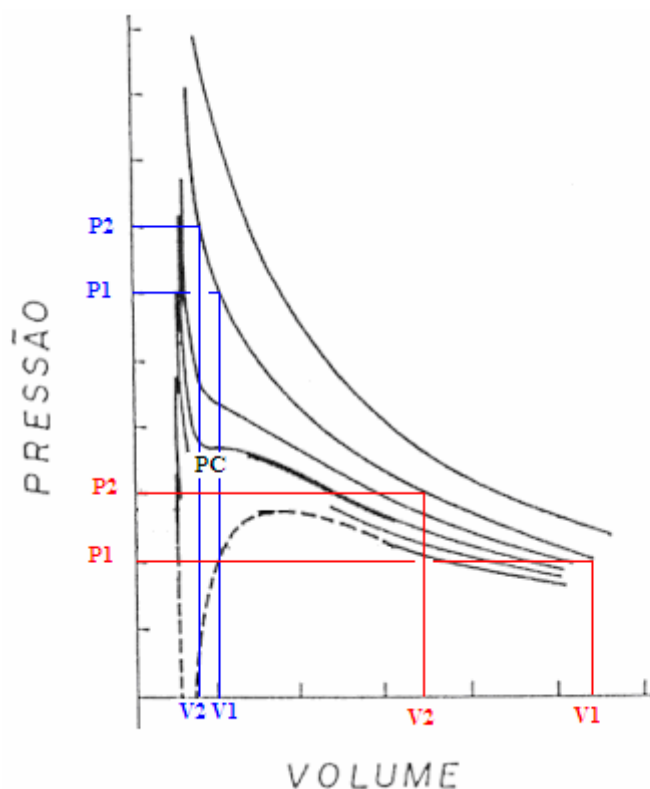


Figura 3 – Diagrama pressão/volume (Fonte: Adaptado de CARRILHO *et al.*, 2001)

2.2. Processo de Extração Supercrítica

O processo de extração consiste numa operação unitária que separa componentes específicos de matérias-primas. É um dos processos industriais mais importantes, fornecendo produtos variados e de ampla utilização no mercado. Neste cenário, a extração supercrítica é uma particularidade de extração onde são empregados solventes acima de seus pontos críticos para extraírem componentes solúveis de matérias-prima.

O processo de extração consiste, basicamente, em uma etapa de solubilização, onde a matéria-prima é posta em contato com o solvente em condições supercríticas e uma etapa de separação, na qual o solvente é separado do extrato quando as condições de temperatura e/ou pressão deixam de ser supercrítica (MCHUGH & KRUKONIS, 1986; WILLIAMS, 1981).

Para ilustrar o funcionamento básico de um processo de extração supercrítica é apresentado na Figura 4 um exemplo simplificado de um fluxograma. Nele, o processo inicia-se com a alimentação de x quantidades matéria-prima no vaso extrator. Numa instalação supercrítica, o modo de operação varia conforme o estado físico da matéria-prima a ser alimentada no vaso extrator. Neste caso, se a matéria-prima for sólida utiliza-se processo em batelada ou semi-contínuo. Se a matéria-prima estiver no estado líquido pode-se utilizar

processo contínuo em contracorrente, por exemplo, com retirada do refinado no fundo do vaso extrator e do extrato no vaso separador.

Para solubilizar os componentes de interesse presentes na matéria-prima, é acrescentada na linha “y” quantidades de solvente que deve ser bombeada e pré-aquecida, de forma a entrar no vaso extrator com as condições de extração pré-estabelecidas. Ou seja, as condições supercríticas são estabelecidas antes do vaso extrator. No exemplo específico o solvente está no estado líquido, por isso a presença de bomba. Nada impede, porém, que o solvente esteja no estado vapor, neste caso a bomba seria substituída por um compressor.

No interior do vaso extrator o solvente solubiliza “z” quantidades do material de interesse, formando a corrente de topo que, por sua vez, é direcionada ao separador. Nesta nova etapa do processo, mudanças de temperatura e/ou pressão desfazem as condições supercríticas. Isto provoca uma alteração na relação de solubilidade entre solvente e material de interesse.

Para o caso específico, a nova condição operacional permite que o solvente seja levado ao estado vapor, formando a corrente de topo do separador. Já o material de interesse é precipitado no fundo do equipamento. Para permitir que o solvente seja recirculado dentro do processo, faz-se necessário a adição de um condensador na linha, localizado logo após o separador. Assim, após a condensação do solvente novo ciclo se inicia.

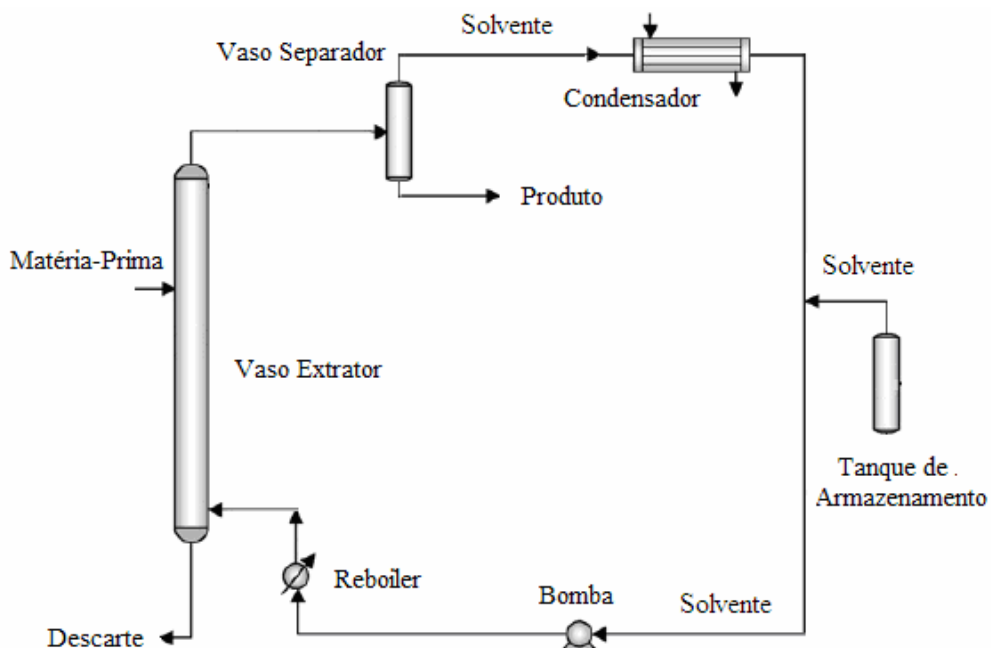


Figura 4 – Processo de extração supercrítica

Além dos equipamentos mencionados acima, é comum em plantas de extração supercrítica a presença de tanques para armazenamento de materiais, a presença de vários extratores, separadores, trocadores de calor, bombas, compressores, além dos dispositivos de medição, controle e segurança.

2.3. Solventes em Estado Supercrítico

Diversas substâncias já foram testadas para atuarem como solventes em processos de extração supercrítica. Por exemplo, água, hexano, etanol, metanol, dióxido de carbono, entre outros, conforme pode ser visualizado na Tabela 2 (MCHUGH & KRUKONIS, 1986). Estes solventes podem ser utilizados individualmente ou associados.

Na utilização de mais de um solvente, comumente conhecido como co-solvente, é possível realizar a etapa de separação em pressões mais baixas, isto reduz substancialmente o tamanho da planta e os custos de operação (COELHO & PAWLISZYN, 2004).

Tabela 2 – Condições críticas de alguns solventes

| Fórmula Molecular | T_C [K] | P_C [Mpa] |
|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| H ₂ O | 647,2 | 22,12 |
| NH ₃ | 405,1 | 11,28 |
| C ₆ H ₆ | 262,1 | 4,89 |
| CO ₂ | 304,2 | 7,38 |
| C ₂ H ₆ | 305,4 | 4,88 |
| SF ₆ | 318,5 | 3,80 |
| N ₂ O | 309,5 | 4,10 |
| C ₃ H ₈ | 369,8 | 4,24 |
| CHF ₃ | 299,0 | 4,8 |

Fonte: MCHUGH & KRUKONIS (1986)

Nos últimos anos, a tecnologia supercrítica, principalmente à base de dióxido de carbono, tem crescido bastante (DIAZ & BRIGNOLE, 2009). Estima-se que cerca de 98% das aplicações que envolvem a extração supercrítica o fazem utilizando dióxido de carbono como solvente (PASQUALI *et al.*, 2006). Isto pode ser explicado pelos seguintes motivos

(MCHUGH & KRUKONIS, 1986): o dióxido de carbono possui pressão crítica moderada e ponto de ebulição baixo, diminuindo os custos do projeto e de operação; é uma substância barata, inerte, inócua e germicida; está disponível em alta pureza e abundante na natureza; não requer um sistema adicional de recuperação do solvente, possibilitando etapas de reciclagem; não é inflamável, tóxico e nem explosivo, fortalecendo a segurança do processo, etc.

2.4. Vantagens da Extração Supercrítica

Um método ideal de extração deve ser rápido, simples, barato, eficiente, sem perdas ou degradação das substâncias. Deve produzir uma amostra pronta para análise sem a necessidade de adição de solventes e não gerar rejeitos. Os métodos tradicionais de extração, frequentemente, apresentam problemas em alguns destes aspectos. Por exemplo, tais solventes muitas vezes requerem alguns dias para fornecer resultados satisfatórios e resultam em extratos diluídos que devem ser concentrados pela evaporação do solvente. Sob o ponto de vista ecológico e de segurança, geram acúmulos de substâncias tóxicas ou emissão destas para a atmosfera (HAWTHORNE, 1990; MCHUGH & KRUKONIS, 1986). A extração supercrítica surgiu com o propósito de contornar estas limitações (PENEDO, 2007).

Uma das grandes vantagens desta tecnologia é permitir o processamento de materiais a baixas temperaturas, diferentemente, por exemplo, da destilação. Isto é especialmente adequado quando compostos termicamente mais sensíveis (também chamados de compostos termolábeis) estão presentes (MCHUGH & KRUKONIS, 1986). Dessa forma, evita-se a degradação desses compostos, que é um problema duplamente prejudicial, pois os produtos degradados comprometem a qualidade do produto final e, também, geram rejeitos indesejáveis que precisam ser tratados. Destaca-se também a diminuição dos gastos com energia térmica que também está intrinsecamente relacionada com a gestão ambiental, já que as formas de produção de energia têm forte impacto sobre o meio-ambiente.

Outra vantagem é a possibilidade de fácil recuperação do solvente, após a etapa de extração, apenas, pelo ajuste de pressão e/ou temperatura, o que permite sua contínua recirculação no processo. Este fato elimina uma das etapas mais dispendiosas dos métodos de extração convencionais que é a separação entre produto extraído e solvente orgânico (PENEDO, 2007). Pode-se citar ainda, como vantagem da extração supercrítica, a rapidez do processo e a alta seletividade da maioria dos produtos extraídos. Esta última facilmente manipulada por variações na temperatura e pressão (COELHO & PAWLISZYN, 2004).

No entanto, a maior vantagem da tecnologia supercrítica é a possibilidade de substituir os solventes orgânicos, tradicionalmente utilizados nos processos convencionais de extração, por solventes ambientalmente menos agressivos como, por exemplo, o dióxido de carbono. Sabe-se que a manipulação de grandes quantidades de solventes orgânicos representa uma dificuldade adicional para o controle ambiental, seja da qualidade do ar, dos efluentes líquidos ou rejeitos sólidos (HAWTHORNE, 1990). Além disso, prejudica a pureza dos produtos, já que os processos, normalmente, sempre deixam uma quantidade de resíduos de solvente no produto final.

2.5. Aplicações e Perspectivas Futuras da Extração Supercrítica

A primeira planta industrial a utilizar fluidos em condições supercríticas foi instalada na Alemanha, no final da década 70, para a descafeinação do café e para a extração de lúpulo, substância utilizada na fabricação de cerveja para conferir aroma (PENEDO, 2007). Devido às vantagens desta tecnologia, sua aplicabilidade rapidamente estendeu-se aos mais variados processos industriais. Por exemplo, separações de frações do petróleo, liquefação do carvão, remediação de solos contaminados, formação de polímeros porosos, separação de soluções orgânicas, regeneração de carvão-ativo, entre outras (MCHUGH & KRUKONIS, 1986; SCHNEIDER, 1983). No entanto, a maior aplicabilidade da extração supercrítica destina-se ao setor agroalimentício para extração de compostos bioativos de óleos vegetais (VELASCO *et al.*, 2007). A Tabela 3 apresenta um breve resumo da potencialidade de uso da tecnologia supercrítica.

Apesar da tecnologia supercrítica apresentar diversas vantagens sobre os demais processos convencionais de extração, um dos maiores problemas concernente a sua implantação industrial consiste na necessidade de se operar em altas pressões (MENDES *et al.*, 2006). Este tipo de situação acarreta alto custo de implantação, operação e manutenção, além de uma abordagem especial em relação à segurança do processo.

Por outro lado, a consolidação da extração supercrítica no setor industrial está diretamente relacionada aos resultados das pesquisas em andamento. Neste aspecto, estima-se que, durante o período de 1994 a 2003, a contribuição brasileira no número de pesquisas desenvolvidas envolvendo este tipo de extração atingiu a marca dos 84% do total de artigos publicados no mundo (MEIRELES & ROSA, 2005). Diante disto, não seria tão discrepante

dizer que as perspectivas para a primeira instalação de uma planta industrial de extração supercrítica no Brasil é uma realidade não muito distante.

Tabela 3 – Aplicações da tecnologia supercrítica

| Setor | Aplicação |
|-------------------|---|
| Produtos Naturais | Redução do teor de nicotina do tabaco |
| | Extração de óleos de sementes vegetais e frutas oleaginosas |
| | Desodorização e redução da acidez de óleos comestíveis |
| | Extração de aromas e fragrâncias de flores, folhas e frutas |
| | Descafeinização de café e chá |
| | Extração de corantes e anti-oxidantes naturais |
| | Extração de estimulantes do cacau |
| | Extração de essências e resinas de madeiras |
| Químico | Regeneração de carvão ativo |
| | Separação etanol-água pela quebra do azeótropo |
| | Recuperação de produtos valiosos de correntes aquosas |
| | Recuperação terciária do petróleo |
| | Extração de óleo de xisto |
| | Extração e purificação de carvão mineral |
| | Remoção de fenóis de correntes aquosas |
| Polímeros | Extração de monômeros residuais da matriz polimérica |
| | Remoção de solvente residual do polímero |
| | Impregnação de aditivos especiais em polímeros |
| | Purificação de polímeros especiais |
| | Formação de polímeros porosos (aerogel) |
| | Precipitação de polímeros |

Fonte: <http://www.agronex.ufba.br>, 2010

2.6. Plantas Industriais de Extração Supercrítica

Embora não exista no Brasil uma planta industrial de extração supercrítica, esta realidade já se faz presente em outros países do mundo. As condições operacionais destas plantas variam conforme o solvente utilizado, os interesses de produção e porte de cada empresa. Por exemplo, a Figura 5 ilustra uma planta industrial de extração supercrítica instalada na Índia. A empresa utiliza dois vasos extratores, cada um com capacidade de 600 litros, para extrair componentes específicos de ervas. A pressão utilizada neste processo é de 500 bar.



Figura 5 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Índia (Fonte: <http://www.natex.at>, 2010)

A Figura 6 ilustra uma planta industrial de extração supercrítica instalada na Nova Zelândia. Esta instalação utiliza três vasos extratores, cada um com capacidade de 850 litros, para extração de lúpulo. O processo ocorre numa pressão de 550 bar.



Figura 6 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Nova Zelândia (Fonte: <http://www.natex.at>, 2010)

A Figura 7 destaca dois vasos extratores, cada um com capacidade de 3800 litros. Esta planta industrial de extração supercrítica está instalada na Coreia do Sul e utiliza uma pressão 550 bar para extrair óleos comestíveis de matérias-primas vegetais.



Figura 7 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Coreia do Sul (Fonte: <http://www.natex.at>, 2010)

A Figura 8 destaca três vasos de extração instalados numa planta industrial de Taiwan. Cada equipamento possui capacidade volumétrica de 5800 litros e operam com pressão de 550 bar. Estes equipamentos são utilizados para remover componentes tóxicos presente no arroz.



Figura 8 – Planta industrial de extração supercrítica situada em Taiwan (Fonte: <http://www.natex.at>, 2010).

A Figura 9 retrata uma planta industrial de extração supercrítica instalada na Espanha. A empresa utiliza três vasos extratores, cada um com capacidade de 8300 litros, para o tratamento do vinhoto. Para isso utilizam uma pressão de 150 bar.



Figura 9 – Planta industrial de extração supercrítica situada na Espanha (Fonte: <http://www.natex.at>, 2010)

Informações complementares das plantas industriais de extração supercrítica descritas acima podem ser encontradas no *site* <http://www.natex.at>. Outras indústrias implantadas na Europa, Ásia e Estados Unidos podem ser consultadas no *site* <http://www.agronex.ufba.br>.

CAPÍTULO 3

SEGURANÇA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

O presente capítulo ressalta a importância de garantir a segurança em plantas químicas. Para isso, destaca-se as consequências de alguns acidentes industriais ocorridos no mundo que poderiam ter sido evitados, caso uma abordagem de Análise de Riscos tivesse sido realizada. Assim, o capítulo também aborda algumas técnicas específicas de Análise de Riscos, bem como fornece exemplos de sua aplicação com base no fluxograma da Figura 4.

3.1 Grandes Acidentes Industriais

O desenvolvimento tecnológico trouxe muitos benefícios para o setor industrial. A possibilidade de operar a altas pressões, elevadas temperaturas, com substâncias mais reativas, etc, possibilitou o aumento da produtividade industrial, refletindo diretamente no fornecimento de mais produtos, e com maior qualidade, ao mercado consumidor. Por outro lado, estas características, somadas ao aumento das dimensões físicas dos equipamentos, para comportar maior quantidade de materiais, trouxe problemas de segurança às instalações.

Ou seja, junto com o desenvolvimento tecnológico desenvolveu-se também o número e a severidade dos acidentes. Estes acidentes podem ser abordados sob duas óticas diferentes: (i) sob a Segurança Ocupacional e; (ii) sob a Segurança de Processos. A primeira categoria trata das questões relacionadas aos acidentes de trabalho mais típicos, como, queda de altura, choque elétrico, atropelamento, etc. Já a segunda categoria refere-se aos acidentes causados por falhas na integridade física dos equipamentos de processo. Normalmente, caracterizado por rupturas, vazamentos ou descontroles operacionais que, leva a perda de contenção de produtos perigosos e a consequências como, incêndios, explosões e intoxicações (DINIZ, *et al.*, 2010).

Embora as duas categorias mereçam uma gestão apropriada e honesta, pode-se dizer que a Segurança de Processo foca em eventos com maior capacidade de dano e, portanto, de maior criticidade. Esta informação pode ser ratificada recorrendo a alguns acidentes de processos ocorridos no mundo e que causaram grandes tragédias. Por exemplo:

➤ Flixborough, Reino Unido

Em 1974, um *by-pass* mal planejado na fábrica da Nypro Ltda sobrecarregou a tubulação provocando uma ruptura de 20 polegadas com vazamento de material inflamável. A nuvem de vapor formada, ao entrar em contato com uma fonte de ignição, resultou numa violenta explosão seguida de um incêndio que destruiu grande parte da planta industrial, conforme pode ser visualizado na Figura 10. De acordo com informações obtidas após o acidente, 1.821 residências e 167 estabelecimentos comerciais, situadas ao redor de 25 metros do centro da explosão, foram danificados, 28 pessoas morreram e 36 ficaram gravemente feridas (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, 2010).



Figura 10 – Destruição da planta industrial da Nypro Ltda (Fonte: <http://zonaderisco.blogspot.com>, 2010)

➤ Seveso, Itália

Em 1976, a ruptura do disco de segurança de um reator numa planta industrial resultou na emissão de uma grande massa de nuvem tóxica para a atmosfera. A causa do vazamento foi atribuída a uma reação exotérmica descontrolada, fazendo com que a pressão interna do vaso excedesse a pressão de ruptura do disco de segurança. Soma-se a isto o fato do evento ter acontecido durante o final de semana quando não havia nenhum funcionário presente na empresa. Estima-se que 1.807 hectares foram contaminados e mais de 193 casos de câncer de pele surgiram. A empresa foi obrigada a evacuar 736 pessoas da região e a descontaminar

toda a região atingida, o que inclui a vegetação, o solo e as edificações (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, 2010), conforme pode ser visto na Figura 11.



Figura 11 – Descontaminação em Seveso (Fonte: <http://latierranoesredonda.blogspot.com>, 2010)

➤ San Juanico, México

Em 1984, o vazamento de gás liquefeito de petróleo (GLP), devido a uma ruptura de oito polegadas de diâmetro, numa tubulação que transportava este gás para um dos reservatórios da empresa formou uma imensa nuvem de gás inflamável. Embora a sala de controle tenha percebido uma queda de pressão na linha, os operadores não conseguiram identificar o local do vazamento. O vento forte no momento do vazamento propiciou o contato desta nuvem com o *flare*, instalado inadequadamente ao nível do solo. No entendimento da empresa, dado à força dos ventos no local, a instalação do *flare* a uma altura mais elevada comprometeria a sua eficiência. O resultado foi uma grande explosão, com a formação de uma imensa “bola de fogo” com mais de 300 m de diâmetro, seguida de explosões sucessivas. As explosões foram tão intensas que dez residências foram atingidas, 650 pessoas morreram e mais de 6.000 pessoas ficaram feridas. Além disso, toda a planta industrial foi destruída (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, 2010), conforme ilustra a Figura 12.



Figura 12 – Destruição da PEMEX (Fonte: <http://zonaderisco.blogspot.com>, 2010)

➤ Bhopal, Índia

Em 1984, uma reação exotérmica descontrolada no complexo industrial da Union Carbide provocou uma sobrepressão em um dos tanques que armazenava pesticida, levando a ruptura da válvula de alívio. Os vapores emitidos deveriam ter sido neutralizados por uma torre de purificação, no entanto, este equipamento estava desligado para manutenção. O gás tóxico liberado para a atmosfera foi levado por um vento sudoeste, atingindo a cidade de Bhopal. De acordo com as informações mais de 4.000 pessoas morreram e cerca de 200.000 ficaram intoxicadas, caracterizando a maior catástrofe da indústria química de todos os tempos (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, 2010).

➤ Vila Socó, Brasil

Em 1984, o alinhamento inadequado de uma tubulação em um dos oleodutos da PETROBRAS espalhou cerca de 700 mil litros de gasolina em uma região alagadiça onde moravam várias famílias em palafitas. Muitos moradores visando conseguir algum dinheiro com a venda de combustível coletaram e armazenaram parte do produto vazado em suas residências. Com a movimentação das marés, o produto inflamável espalhou-se pela região alagada que, ao entrar em contato com uma fonte de ignição, explodiu. O fogo se alastrou por toda a área alagadiça, incendiando as palafitas. O número oficial de mortos neste evento foi de 93, porém algumas fontes citam um número extra-oficial superior a 500 vítimas fatais, baseado no número de alunos que deixou de comparecer à escola e a morte de famílias inteiras sem que ninguém reclamasse os corpos. Além disso, dezenas de pessoas ficaram

feridas e a vila foi parcialmente destruída (<http://www.cetesb.sp.gov.br>, 2010), conforme ilustra a Figura 13.



Figura 13 – Destruição da Vila Socó em Cubatão, São Paulo (Fonte: <http://zonaderisco.blogspot.com>, 2010)

Entre 1974 e 2002 foram registrados mais de doze grandes acidentes no mundo que, não só trouxeram malefícios para a população, como também para o meio ambiente e a própria instalação. A Figura 14 mostra um resumo de alguns acidentes de processos ocorridos ao longo das últimas décadas no mundo (DINIZ *et al.*, 2010).

Quase 500 mil pessoas morrem anualmente no Brasil por conta de acidentes e doenças relacionadas ao trabalho. No mundo o número chega a cinco mil mortes por dia. Indústria, serviços e agricultura são os setores mais perigosos (<http://www.mte.gov.br>, 2010).

Estes eventos provocaram ações regulamentadoras pelo mundo, com destaque para as diretivas de Seveso I e II, na Europa, e para as Normas americanas da OSHA e EPA (DINIZ *et al.*, 2010). No Brasil existem 34 Normas Regulamentadoras utilizadas para aumentar o nível de segurança das empresas. Estas Normas podem ser encontradas, em sua íntegra, no *site* http://www.mte.gov.br/legislacao/Normas_regulamentadoras/default.asp.

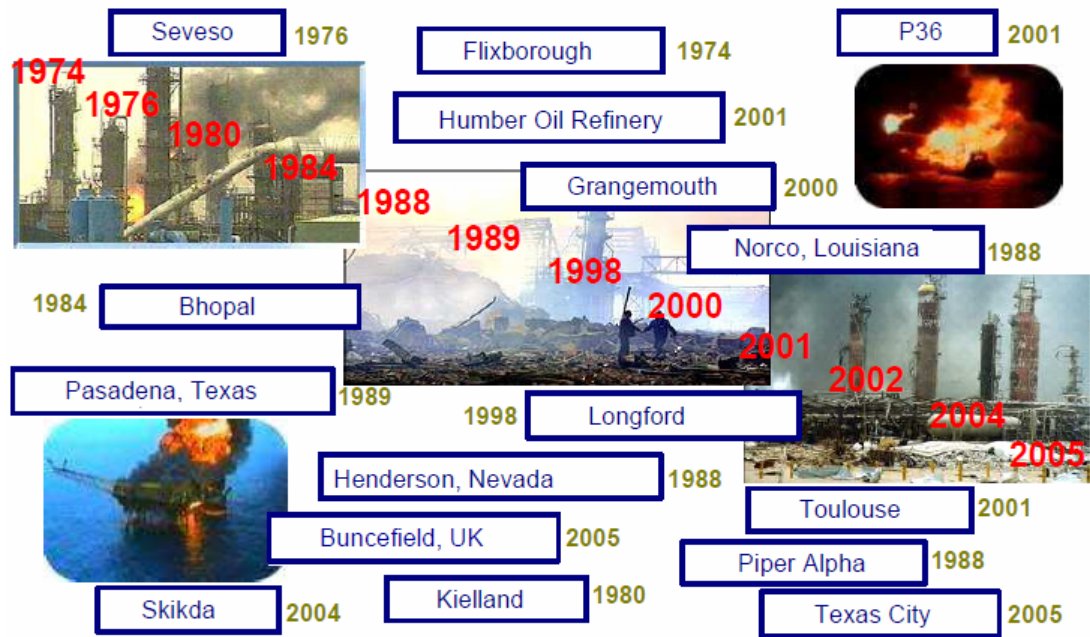


Figura 14 – Acidentes de processo ocorridos nas últimas décadas no mundo (Fonte: DINIZ *et al.*, 2010)

É evidente que a prevenção de acidentes não se faz, simplesmente, com a aplicação de Normas. Principalmente porque estes documentos aplicam-se de forma genérica, ou seja, desconsideram um cenário de risco específico. Diante disso, e da necessidade de evitar acidentes como aqueles descritos anteriormente, muitas técnicas foram criadas, e são constantemente aperfeiçoadas, para verificar, não somente se uma determinada instalação industrial segue todas as diretrizes estabelecidas por Normas apropriadas, mas também para identificar antecipadamente fontes potenciais de perigos. Esta abordagem é feita através dos estudos de Análise de Riscos. Este tipo de abordagem é fundamental para aumentar o nível de segurança de uma planta industrial. Sem este tipo de abordagem, os riscos podem ser negligenciados, implicando em avaliações incompletas e perdas (DUNJÓ *et al.*, 2010).

3.2 Estudo de Análise de Riscos

Embora o termo risco esteja em foco no setor industrial, há algum tempo, conceituar esta palavra não é tão fácil como parece. Muitas vezes risco é confundido com perigo, levando a longas discussões. Para efeitos de esclarecimento, entende-se por perigo uma fonte ou situação com potencial para provocar danos em termos de lesão, doença, dano à

propriedade, dano ao meio ambiente, ou uma combinação destes. Já a palavra risco, refere-se à relação existente entre a probabilidade que existe de uma falha ocorrer e efeitos esperados para estes casos (SILBERMAN & MATTOS, 2008). Os riscos são, usualmente, classificados em especulativos (ou dinâmicos) e puros (ou estáticos). Os riscos especulativos envolvem uma possibilidade de ganho ou uma chance de perda. Os riscos puros somente envolvem os eventos com possibilidades de perdas (CASTELLAR, 2010). Sendo assim, os riscos puros podem afetar pessoas, comunidades, meio ambiente e instalações da própria empresa, conforme ilustra a Figura 15.



Figura 15 – Possibilidades de interação do risco (Fonte: ZIMMERMANN, 2009)

Além de perigo e risco, é igualmente importante entender o significado das palavras falha, acidente e incidente. Sendo assim, entende-se como falha o término da capacidade de um item desempenhar a função requerida; acidentes são eventos não-planejados que resultam em morte, doença, lesão, dano ou outra perda e; incidentes são todos os eventos que dão origem a um acidente ou que tinham o potencial de levar a um acidente (DIAS, 2010; FEPAM, 2001). Observe que tanto o acidente quanto o incidente, representam a materialização de uma fonte potencial de perigo e que uma falha não necessariamente pode levar a um acidente.

Neste cenário, o estudo de Análise de Riscos compreende todas as atividades que buscam situações, combinações de situações e estados de um sistema que representam fontes potenciais de perigos. O sistema pode ser um equipamento, um projeto, um processo, a prestação de um serviço ou mesmo um produto. Assim, a Análise de Riscos busca compreender a(s) causa(s) de um perigo potencial para o sistema, bem como analisar suas consequências e a probabilidade de sua materialização (PERRY *et al.*, 2008). Através deste tipo de estudo é possível estabelecer maneiras corretas para realização das tarefas de forma

que os atos inseguros, condições inseguras, acidentes, falhas, retrabalhos e desperdícios não ocorram num determinado sistema (DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006; BRASIL, 2003).

Uma Análise de Riscos ideal, portanto, é aquela que consegue identificar o maior número possível de fonte de perigos, num curto espaço de tempo e cujas recomendações apresentadas possam ser implantadas de forma fácil e econômica. Suas principais vantagens são: reconhecer antecipadamente os perigos; minimizar a probabilidade e severidade das falhas; aumentar a confiabilidade e segurança do sistema; reduzir as despesas pagas com seguros; introduzir questões de aceitabilidade do risco na organização; auxiliar nas tomadas de decisão; melhorar a alocação de recursos financeiros, materiais e humanos; ampliar a participação da organização no mercado nacional e internacional, entre outras (AGUIAR, 2010; CASTELLAR, 2010; CANGUSSÚ, 2007; BAJPAI & GUPTA, 2005; NUNES, 2002;).

A prática de Análise de Riscos, Normalmente, é realizada por um grupo multidisciplinar, formado por engenheiros, técnicos, especialistas e outros, que questionam um determinado sistema, através de práticas de *brainstorming*, para identificar cenários de riscos e pontos vulneráveis (AGUIAR, 2010). A formação do grupo varia conforme os interesses e a necessidade de cada empresa. De tal maneira que um grupo maior e mais diversificado fornece resultados mais amplos e detalhados, no entanto os gastos são maiores e torna-se mais difícil mantê-lo constante por muito tempo.

A Análise de Riscos compreende, basicamente, seis etapas: (i) identificação das fontes de perigos; (ii) identificação das causas de cada perigo identificado; (iii) estimativa das consequências, (iv) estimativa da frequência; (v) estimativa dos riscos; (vi) propostas de recomendações e suas implementações.

➤ Identificação das fontes de perigos

A identificação de perigos compreende a busca de todas as atividades, estados, situações, ou combinações de situações de um sistema que possam levar a um evento indesejável (DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006; SONNEMANS & KÖRVERS, 2005). O vaso extrator presente numa planta industrial de extração supercrítica está sujeito a vários tipos de perigos. Por exemplo, falhas humanas no controle e funcionamento do processo, erros de fabricação, falha na instalação, falta de manutenção, problemas estruturais por causa de desvios operacionais, impactos mecânicos, desastres naturais, ataques terroristas, problemas nas instalações elétricas, entre outros (CASTELLAR, 2010; SKLET, 2006; BAJPAI & GUPTA, 2005; LUCAS *et al.*, 2003). Em relação aos perigos de caráter estrutural, os problemas mais

comuns que podem ocorrer em vasos de pressão e causar sua ruptura são: a deformação elástica excessiva, deformação plástica excessiva, fluência a alta temperatura, fratura, fadiga e corrosão (ASME, 2005).

De forma resumida, entende-se por elasticidade a propriedade do material de retornar a sua forma original quando a força externa atuante sobre ele for removida. Acima do limite de elasticidade diz-se que o material atingiu a região plástica tornando-se incapaz de retornar a sua forma inicial, mesmo que se remova a carga externa, ou seja, na região de plasticidade, as deformações são permanentes. A fluência consiste na deformação permanente do material quando este é submetido a uma carga ou tensão constante, durante certo período de tempo. A fratura dúctil caracteriza-se pelo rompimento do material devido à tração que exhibe uma deformação plástica substancial com grande absorção de energia. Quando o rompimento do material ocorre devido à tração, mas existe pouca, ou nenhuma deformação plástica, com baixa absorção de energia, chama-se fratura frágil. O termo fadiga é utilizado quando a falha ocorre após um longo período de tensão repetitiva (PARETO, 2004; PLANAS-CUCHI *et al.*, 2004; TELLES, 1979).

A corrosão é um fenômeno de interface que afeta materiais orgânicos e, principalmente, materiais inorgânicos, sendo manifestada através de reações químicas ou eletroquímicas que pode, ou não, estar associada aos esforços mecânicos (PERRY *et al.*, 2008; PINTO *et al.*, 2008; GEMELLI, 2001). O estudo da corrosão é muito importante no projeto de qualquer equipamento, pois evita problemas de quebra, a substituição prematura de peças, paralisações inesperadas, replanejamentos de produção, perdas de produtos, perda da eficiência do processo, etc. Todos estes fatores interferem diretamente no aumento dos custos numa planta industrial. Os tipos de corrosão mais comuns em plantas industriais de extração supercrítica são a corrosão uniforme, por pites, sob tensão, por fissuras e intergranulares (MARRONE & HONG, 2009). O detalhamento destes tipos de corrosão e de outros podem ser encontrados nos trabalhos de MARRONE & HONG (2009), PERRY *et al.*, (2008), GENTIL (2003), WOLYNEC (2003), GEMELLI (2001), DUTRA & NUNES (1999), CHIAVERINI (1986) e TELLES (1979).

➤ Identificação das causas de cada perigo identificado

Todos os problemas estruturais identificados anteriormente podem ser relacionados aos dois parâmetros mais importantes do processo de extração supercrítica: pressão e temperatura. Neste sentido, o aumento excessivo da temperatura eleva a pressão de vapor das

substâncias presentes no interior do vaso que, por sua vez, exerce maior tensão nas paredes do equipamento, podendo provocar deformações plásticas excessivas, deformações elásticas excessivas, fadiga, fluência e fratura dúctil (MESQUITA & BARBOSA, 2007; ASME, 2005).

Quando o solvente utilizado no processo de extração supercrítica for o dióxido de carbono, o aumento excessivo da pressão também intensifica os efeitos corrosivos devido à elevação das pressões parciais desta substância (PINTO *et al.*, 2008; KERMANI & MORSHED, 2003; NESIC & LUNDE, 1994). Estes efeitos corrosivos também são mais pronunciados em baixas temperaturas (GEMELLI, 2001), principalmente se a temperatura for abaixo de 70 °C (GOMES, 2005).

A fratura frágil é outro problema que pode surgir por causa das baixas temperaturas (PERRY *et al.*, 2008). A estrutura do vaso extrator também pode ser comprometida quando a pressão no equipamento for muito baixa, isto porque se o equipamento for submetido a vácuo intenso, sua parede pode ser literalmente “sugada”. Na Tabela 4 há um resumo que relaciona os perigos que podem levar a ruptura do vaso extrator com a temperatura e pressão.

Tabela 4 – Perigos estruturais para o vaso extrator associados aos desvios operacionais de temperatura e pressão

| Problemas Estruturais | Causas |
|---------------------------------|---|
| Deformação elástica excessiva | |
| Deformação plástica excessiva | |
| Fluência | Aumento excessivo da temperatura |
| Fratura dúctil | Aumento excessivo da pressão |
| Fadiga | |
| Fratura frágil | Diminuição excessiva da temperatura |
| Corrosão por dióxido de carbono | Diminuição excessiva da temperatura Aumento excessivo da pressão |

Obviamente, existem causas ainda mais básicas que levariam ao aumento, ou a diminuição, excessiva da temperatura e da pressão. Por exemplo, problemas na bomba/compressor, entupimento das linhas e equipamentos a jusante do vaso extrator, bloqueio indevido da válvula redutora de pressão, são alguns exemplos de situações que poderiam provocar o aumento excessivo da pressão interna do vaso. Desvios operacionais nos

trocadores de calor poderiam levar à diminuição ou aumento excessivo da temperatura que, por sua vez, afetaria diretamente na pressão do sistema. O detalhamento do nível de relação entre estes fenômenos e suas causas pode ser obtido por meio de simuladores específicos.

➤ Estimativas das consequências

A análise de consequências é a medida dos efeitos físicos negativos de um acidente na região afetada, que podem atingir pessoas, equipamentos e o meio ambiente (PERRY *et al.*, 2008). De tal maneira que as consequências de um evento dependem das características físico-químicas das substâncias envolvidas, da quantidade, das condições operacionais, do número de pessoas presentes no momento do acidente, bem como das demais instalações presentes, entre outras (DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006).

Os efeitos de um acidente podem ser classificados em relação ao tempo e ao modo de manifestação. Em relação ao tempo, os efeitos podem ocorrer de forma imediata, retardada ou em longo prazo. Em relação ao modo, os efeitos podem ser deterministas (dado a ocorrência do evento existe a certeza da ocorrência dos efeitos) ou estocásticos (dado a ocorrência do evento existe a probabilidade de ocorrência dos efeitos).

A determinação da intensidade dos efeitos de um cenário de acidente, normalmente, ocorre por meio de simuladores que levam em consideração as consequências da radiação térmica (incêndio), da sobrepressão (explosão) e da concentração tóxica (liberação de nuvens de gases), ou por equações matemáticas capazes de prever a probabilidade de uma pessoa ou de um equipamento ser afetado após o acidente. Um modelo matemático muito utilizado é o método PROBIT que consiste num modelo estatístico de vulnerabilidade que informa a probabilidade de lesões em pessoas e construções expostas a uma fonte térmica, uma sobrepressão ou uma dispersão tóxica (LUCAS *et al.*, 2003).

Admitindo que no vaso extrator estejam presentes óleos vegetais (matéria-prima) e dióxido de carbono (solvente), pode-se dizer que sua ruptura, fatalmente, irá liberar estas substâncias na área de processo. Nesta situação três consequências indesejadas podem ocorrer (modo estocástico): incêndios, explosões e intoxicações.

Em relação ao vaso extrator, é fundamental que o produto seja mantido em sua contenção primária e não no ambiente externo onde o seu comportamento pode se tornar bastante incerto. A liberação de grande quantidade de óleo vegetal, substância inflamável, na área de processo pode, em contato com uma fonte de ignição, causar focos de incêndios. O risco de incêndio num determinado local depende da quantidade e da qualidade do

combustível presente. Estima-se que 100 toneladas de material inflamável gera, em média, 5×10^{12} J de energia num intervalo de tempo de 10 a 20 segundos. Para se ter uma ideia, um quarto dessa energia já é suficiente para queimar pessoas, causar danos às propriedades e provocar incêndios secundários (MAKHVILADZE *et al.*, 1999). Normalmente, óleos vegetais apresentam um calor de combustão na faixa de 4×10^7 J por quilograma de óleo presente (<http://www2.dbd.puc-rio.br>, 2010). Focos de incêndios também podem provocar incêndios e explosões sucessivas no chamado “efeito dominó”, aumentando ainda mais o poder de destruição deste evento (ABBASI & ABBASI, 2007).

A explosão é outra consequência que pode ocorrer numa eventual ruptura do vaso extrator. Geralmente, está associada ao aumento de energia interna do equipamento que é utilizada para provocar o aquecimento do ambiente, deformar o equipamento, romper o vaso, movimentar os fragmentos e causar deslocamento de ar (SILVA, 2010). Um dos efeitos negativos deste evento é o deslocamento de fragmentos do equipamento. Estima-se que 20% da energia envolvida numa explosão é repassada aos fragmentos na forma de energia cinética provocando o seu deslocamento (KE, 2009).

Na literatura são mencionadas peças de 400 toneladas percorrendo distâncias de 30,48 m após uma explosão; pedaços de equipamentos de 11 Kg e 5 Kg lançados a 30 e 70 m, respectivamente; chapas de 40 toneladas encontradas a 300 m de distância do local da explosão; fragmentos atingindo alvos a distâncias de 1,7 quilômetros, etc (ABBASI & ABBASI, 2007).

Além da projeção dos fragmentos, a explosão, ainda, causa o deslocamento do ar conhecido como “onda de pressão” ou “onda de choque” (SALZANO & COZZANI, 2006). Os seres humanos suportam, sem nenhum tipo de danos, pressões de, apenas, 1,02 Kgf/m². “Ondas de choque” com pressão variando entre 713,8 a 1019,72 Kgf/m² são suficientes para provocar a queda de pessoas. Pressões situadas no intervalo de 3569,01 a 10197,16 Kgf/m² provocam ruptura do tímpano e de 20394,32 a 509858,8 Kgf/m² provocam lesões nos pulmões. “Ondas de pressão” na faixa de 71380,12 a 152957,4 Kgf/m² são fatais aos seres humanos (SILVA, 2010). Um resumo destes efeitos está disposto na Tabela 5.

Tabela 5 – Efeitos de uma onda de choque ao ser humano

| Efeitos | Pressão [Kgf/m²] |
|--------------------|------------------------------------|
| Não causa danos | Até 1,02 |
| Queda | 713,8 – 1019,72 |
| Ruptura do tímpano | 3569,01 – 10197,16 |
| Lesões nos pulmões | 20394,32 – 509858,8 |
| Morte | 71380,12 – 152957,4 |

Fonte: Adaptado de SILVA (2010)

O deslocamento de ar também pode comprometer a estrutura física dos equipamentos e da própria instalação (SALZANO & COZZANI, 2006). Por exemplo, variações de pressão de 101,97 a 152,96 Kgf/m² são suficientes para quebrar janelas; 356,9 a 764,79 Kgf/m² causam danos mínimos em construções; 764,79 a 1274,64 Kgf/m² danificam painéis metálicos; 1274,64 a 2039,43 Kgf/m² painéis de madeira; 2039,43 a 3059,15 Kgf/m² falhas em tijolos; 3059,15 a 5098,58 Kgf/m² são suficientes para provocar o rompimento de tanques de refinarias; 4078,86 a 6118,3 Kgf/m² causam danos em estruturas concretadas e de 7138,01 a 8157,73 Kgf/m² provocam a destruição total da maioria das construções (SILVA, 2010). Um resumo dos efeitos físicos nas estruturas, em geral, causados por uma “onda de choque” é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 – Efeitos de uma onda de choque às instalações em geral

| Efeitos | Pressão [Kgf/m²] |
|---|------------------------------------|
| Quebra de janelas | 101,97 – 152,96 |
| Danos mínimos em construções | 356,9 – 764,79 |
| Danos em painéis metálicos | 764,79 – 1274,64 |
| Falhas de painéis de madeira | 1274,64 – 2039,43 |
| Falhas em paredes de tijolo | 2039,43 – 3059,15 |
| Rompimento de tanques de refinaria | 3059,15 – 5098,58 |
| Danos em estruturas concretadas | 4078,86 – 6118,3 |
| Destruição total da maioria das construções | 7138,01 – 8157,73 |

Fonte: Adaptado de SILVA (2010)

Embora as Tabelas 5 e 6 forneçam uma visão geral dos efeitos negativos causados por uma explosão é preciso saber que a força de uma “onda de pressão” deve agir durante um tempo suficiente para vencer a inércia e deformar o alvo. Portanto, o poder de destruição dependerá da intensidade da explosão, do tempo de incidência da sobrepressão no alvo e da resistência que o alvo oferece.

Alguns cuidados também devem ser tomados em relação ao limite máximo de exposição permitido para uma pessoa, em ambiente confinado, na presença de altas concentrações de dióxido de carbono. Isto porque, o dióxido de carbono é um gás (nas condições Normais de pressão e temperatura) com densidade maior do que o oxigênio do ar. Ou seja, a presença de dióxido de carbono no ambiente desloca o oxigênio para regiões mais elevadas, ocasionando problemas de asfixia.

Normalmente, admite-se para um dia normal de trabalho (8 horas/dia ou 40 horas/semana) uma concentração de dióxido de carbono de até 5.000 ppm. Em ambientes com concentrações de dióxido de carbono acima de 30.000 ppm é recomendável que o operário não permaneça neste local por mais de 15 minutos (LUCAS *et al.*, 2003).

➤ Estimativa da frequência

A estimativa da frequência indica a probabilidade de ocorrência das hipóteses acidentais decorrentes das falhas nos equipamentos ligados às instalações ou atividades da análise. Da mesma maneira, a estimativa de probabilidade de erros do homem deve ser quantificada nesta etapa. Esses dados normalmente são difíceis de serem estimados já que há poucos estudos abordando confiabilidade humana.

Em determinados estudos, os fatores externos da empresa podem contribuir para o risco de uma instalação. Nesses casos, também deve ser considerada a probabilidade ou a frequência do acontecimento de eventos não desejáveis causados por terceiros ou por agentes externos ao sistema em estudo, como terremotos, enchentes, deslizamentos de solos, quedas de aeronaves entre outros.

Dois tipos de abordagem podem ser realizados para estimação da frequência: através do uso de modelos matemáticos probabilísticos ou por meio de consulta a Bancos de Dados. Em relação aos Bancos de Dados, diversas instituições mantêm informações relativas à confiabilidade de equipamentos para instalações perigosas. Algumas referências podem ser encontradas no *site* <http://www.nrcomentada.com.br/default.aspx?code=8&item=344>.

Quanto ao tema "confiabilidade humana", os dados de falhas devem ser utilizados com muito cuidado porque existem muitos fatores que interferem nas taxas de falhas, tais como, tipos de falhas, condições ambientais, características dos sistemas envolvidos, tipos de atividades ou operações feitas, capacitação das pessoas envolvidas, motivação, disponibilidade de Normas de qualidade e procedimentos operacionais, tempo disponível para a execução de tarefas, etc.

➤ Estimativas dos riscos

A estimação dos riscos é feita através da combinação das frequências de ocorrência das hipóteses de acidentes e das suas respectivas consequências. Pode-se expressar o risco de diferentes formas, de acordo com o objetivo do estudo de Análise de Riscos em questão. Geralmente, os riscos são expressos em índices de risco, risco social ou risco individual. Um índice de risco muito utilizado para determinar a taxa potencial de incêndio e explosão numa planta industrial é o Índice F&EI – *Fires and Explosions Index* (LUCAS *et al.*, 2003).

Em relação ao risco individual, entende-se como a frequência anual esperada de morte devido a acidentes com origem em uma instalação para uma pessoa situada em um determinado ponto nas proximidades da mesma. Já risco social está associado a uma instalação ou atividade e informa o número de mortes esperadas por ano em decorrência acidentes com origem na instalação/atividade, usualmente expresso em mortes/ano (FEPAM, 2001).

➤ Propostas de recomendações e suas implementações

Após a estimação dos riscos é possível propor recomendações para diminuir a frequência dos eventos e/ou mitigar suas consequências. É preciso estabelecer quais entre os riscos estimados devem ser primeiramente tratados e, Normalmente, esta análise é realizada em cima dos riscos mais severos e com maior probabilidade de ocorrer. Obviamente que é preciso realizar uma análise dos custos e benefícios das recomendações propostas. Isto envolve o esforço e tempo de aplicação das medidas preventivas.

Neste sentido, uma metodologia muito utilizada é a denominada ALARA (do inglês, *As Low as Reasonably Achievable* – Tão Baixo Quanto Razoavelmente Atingível) que, às vezes, também pode ser encontrada na literatura como ALARP (*As Low as Reasonably Possible* – Tão Baixo Quanto Razoavelmente Possível). De acordo com esta metodologia, os riscos devem ser reduzidos sempre que o custo das medidas necessárias para sua redução

forem razoáveis, quando comparadas com os benefícios obtidos em termos de redução de riscos (FEPAM, 2001).

Um risco elevado não pode de nenhuma forma ser admitido por uma organização. Já um risco médio pode ser aceito caso não haja condições práticas de reduzi-lo. Ou seja, um risco deve ser reduzido até que se esgotem as condições razoáveis disponíveis de forma que o ganho a ser obtido com sua redução adicional não justifique o investimento no controle em questão.

3.3 Técnicas de Análise de Riscos

As técnicas de Análise de Riscos são classificadas em qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas (SONNEMANS & KÖRVERS, 2005). A escolha da técnica irá depender, dentre outros fatores, do sistema a ser investigado, do nível de detalhamento desejado na análise e dos recursos disponíveis para sua execução (MARTINS & NATACCI, 2010). Normalmente a primeira abordagem que se faz é a aplicação de um método qualitativo para verificar se a organização segue todas as diretrizes estabelecidas por Normas Regulamentadoras (DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006).

A análise quantitativa é usada, apenas, para os casos em que os dados numéricos são imprescindíveis como, por exemplo, para efetuar tomadas de decisão (ZIMMERMANN, 2009). Estimativas apontam que 1% dos estudos de Análise de Riscos estende-se a este tipo de abordagem, devido os custos mais elevados e por consumirem um tempo maior de aplicação (BAUM *et al.*, 2009). O uso de técnicas semi-quantitativas ganha cada vez mais destaque no cenário industrial, uma vez que esta abordagem é capaz de qualificar os cenários de riscos e fornecer certo tipo de quantificação sem a complexidade dos métodos puramente quantitativos (MURPHY *et al.*, 2009).

Existem muitas técnicas de Análise de Riscos na literatura que podem ser utilizadas para aumentar o nível de segurança de um sistema. Neste sentido, uma ótima referência a ser consultada é o trabalho de TIXIER *et al.* (2002). Segue abaixo uma breve descrição de seis técnicas qualitativas (Análise *What If*, *Checklist*, Análise Histórica de Acidentes, Técnicas de Incidentes Críticos, Matriz de Riscos, Análise Preliminar de Perigo, Estudo de Perigos e Operabilidade, Análise de Árvore de Eventos), duas técnicas quantitativas (Análise de Árvore de Falhas, Análise do Modo de Falhas e Efeitos) e uma técnica semi-quantitativa (Análise das

Camadas de Proteção). Para facilitar a compreensão destas técnicas, alguns exemplos serão demonstrados com base no fluxograma proposto da Figura 4.

➤ *Análise What If*

A Análise *What If* é uma das técnicas qualitativas mais simples e de uso genérico. Baseia-se na aplicação da pergunta “o que aconteceria se” sobre um determinado sistema com o objetivo de simular situações imprevistas, suas consequências e causas. O principal objetivo é a identificação de potenciais de riscos, que passaram despercebidos em outras fases do estudo de segurança, e propor medidas para evitar que a falha ocorra (BENEDETTI, 2006). O conceito é permitir a troca de ideias entre os participantes das reuniões, favorecendo o entendimento do sistema (CANGUSSÚ, 2007). Ela pode ser empregada a todo tipo de instalação, especialmente àquelas com cenários de riscos relativamente simples (MARTINS & NATACCI, 2010). Sua limitação, no entanto, se deve algumas vezes, àquelas propostas de difícil condição de realização, seja na prática ou por questões econômicas (BROWN, 1998).

Exemplo de aplicação:

Em relação à análise *What If*, pode-se questionar, por exemplo, o vaso extrator presente no fluxograma da Figura 4 com as seguintes perguntas: O que aconteceria na planta se ocorresse a ruptura do vaso extrator? Quais seriam as causas que levariam a ruptura do vaso extrator? O que poderia ser feito para evitar estas causas básicas?

➤ *Checklist*

Um dos meios mais comuns para identificar perigos é através da “lista de verificação” ou *Checklist*. Consiste na avaliação do sistema em face de critérios pré-estabelecidos na forma de uma ou mais listas de perguntas com respostas previamente formatadas. A técnica gera listas qualitativas de determinações de conformidades e não conformidades, com recomendações para a correção das não conformidades (MARTINS & NATACCI, 2010).

A formulação da lista de perguntas e respostas pode ser obtida de várias maneiras como, por exemplo, baseado em publicações especializadas sobre engenharia de segurança, junto a corretoras de seguros, em manuais, etc (CASTELLAR, 2010). Normalmente, o *Checklist* é utilizado como complemento, ou parte integrante, de outro método e, também, pode ser aplicada em todas as fases de um empreendimento (MARTINS & NATACCI, 2010; NUNES, 2002).

Exemplo de aplicação:

Diante das respostas obtidas com o exemplo de aplicação 1 pode-se criar uma “lista de verificação” especificando os procedimentos de rotina que devem ser estabelecidos pelo operador para evitar que o evento “ruptura do vaso extrator” aconteça. Por exemplo, uma das causas que poderia levar a ruptura do vaso extrator seria o aumento excessivo da pressão interna do equipamento. Baseado nisto, poder-se-ia especificar os seguintes itens a serem verificados: O indicador de pressão está funcionando corretamente? (Sim ou Não); A pressão do vaso extrator está de acordo com o especificado? (Sim ou Não); A pressão está sendo aferida corretamente? (Sim ou Não), etc.

➤ **Análise Histórica de Acidentes**

A Análise Histórica de Acidentes é uma pesquisa de acidentes ocorridos em instalações industriais similares a que se está estudando, visando a dedução da tipologia dos acidentes, suas causas mais freqüentes e/ou relevantes e a magnitude média das conseqüências de cada falha (CANGUSSÚ, 2007). Essas informações são obtidas, por meio de relatos técnicos, literaturas especializadas, ou por meio de consultas a Bancos de Dados de Acidentes, tais como, o MHIDAS (*Major Hazard Incident Data Service*) localizado no Reino Unido, o SONATA (*Summary of Notable Accident in Technical Activities*) localizado na Itália e o CATIA (Cadastro de Acidentes no Transporte, Indústria e Armazenamento) localizado no Brasil. Outros Bancos de Dados de Acidentes podem ser encontrados em NUNES (2002).

A Análise Histórica de Acidentes tem como principal objetivo a identificação de eventos, envolvendo os produtos manuseados na instalação que resultariam em potenciais de explosões, incêndios, poluição ambiental e acidentes pessoais graves (BROWN, 1998). É uma técnica que, sempre que possível, deve ser empregada, pois além de evidenciar perigos potenciais, permite fazer estimativas reais da frequência de ocorrência dos eventos de interesse (MARTINS & NATACCI, 2010).

➤ **Técnica de Incidentes Críticos**

A Técnica de Incidentes Críticos (TIC) é um procedimento qualitativo, que se originou durante a II Guerra Mundial em um programa psicológico de avaliação da Força Aérea dos Estados Unidos em meados de 1941. Seus principais objetivos são detectar o elevado número de ocorrência de acidentes que envolvam instruções erradas, deficiência nos equipamentos e falta de treinamento (BENEDETTI, 2006). A técnica funciona com a seleção de uma amostra

de observadores, selecionados nos principais departamentos da empresa, que relatam por meio de entrevistas secretas atos/condições inseguras que tenham cometido ou observado.

Estas informações são transcritas e classificadas em categorias de riscos, a partir das quais se define as áreas mais vulneráveis. Assim, é possível estabelecer uma escala de prioridades a ser seguida (CASTELLAR, 2010). Um dos problemas desta técnica está relacionado com a riqueza de detalhes que as pessoas respondem, ou seja, se os convidados, no momento da interrogação, não informarem de tudo o que ele viu ou presenciou, a descrição do cenário será deformada. Além disso, muitas pessoas têm receio de retaliações dentro da empresa e optam por não relatarem todos os atos/condições inseguras (BENEDETTI, 2006).

➤ Matriz de Riscos

A Matriz de Riscos é uma técnica que permite fazer uma avaliação comparativa dos cenários de riscos. Consiste numa representação gráfica onde para cada fonte potencial de perigo são associadas uma categoria de frequência de ocorrência e uma categoria de severidade da consequência. Sua estrutura fornece resultados de fácil identificação (MARTINS & NATACCI, 2010), auxiliando na alocação de recursos, uma vez que as áreas com maior potencial de risco podem ser primeiramente abordadas e com uma frequência maior.

A Matriz de Risco é construída disponibilizando em linhas e colunas as categorias de probabilidade de ocorrência do evento indesejado e a severidade de suas consequências, numa espécie de tabela (FLEMING & GARCIA, 2010; MISHINA *et al.*, 2006; PINTO *et al.*, 2008). A multiplicação dessas duas categorias fornecerá áreas de risco a serem mitigadas. Apesar de envolver uma análise de frequência e consequência, a Matriz de Riscos não é capaz de identificar fontes de perigos, suas causas, os meios de detecção já existentes, nem mesmo fornece em sua estrutura final um conjunto de medidas a serem implementadas.

Exemplo de aplicação:

Em relação à extração supercrítica, muitas vezes o excesso de pressão não é suficiente para causar a ruptura do vaso extrator, entretanto é capaz de provocar a operação dos dispositivos de segurança (válvulas e discos de ruptura). Neste caso, numa eventual liberação de dióxido de carbono na área de processo, por exemplo, fatalmente poderia causar problemas de asfixia, visto que esta substância desloca o oxigênio do ar para regiões mais elevadas (a densidade do dióxido de carbono é maior do que o oxigênio).

Concentrações de dióxido de carbono de até 1% são bem toleradas pelos seres humanos, sem danos a saúde; concentração de 7% por uma hora desencadeia rápida deteriorização da capacidade mental, prejuízo auditivo e visual; concentração de 15 - 20% causa o aumento das taxas de respiração, acompanhada de rápida perda de consciência e espasmos musculares; para concentrações de 20 - 30% há convulsões em 1 a 3 minutos, sendo que a permanência do indivíduo neste ambiente fatalmente levará ao aparecimento de edemas e à morte (NETO *et al.*, 2003).

Através destas informações é possível sugerir a construção de uma Matriz de Riscos. Primeiro relaciona-se em uma tabela a concentração do dióxido de carbono com os seus efeitos toxicológicos criando uma categoria de severidade dos perigos identificados, conforme demonstra a Tabela 7.

Tabela 7 – Categoria de severidade dos perigos identificados

| Categoria | Denominação | Concentração de CO₂ | Efeitos colaterais |
|------------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| I | Desprezível | Até 1% | - Não causa danos |
| II | Preocupante | 7% | - Prejuízo mental; - Prejuízo auditivo; - Prejuízo visual. |
| III | Crítica | 15 - 20% | - Respiração ofegante; - Rápida perda de consciência; - Espasmos musculares |
| IV | Catastrófica | 20 - 30% | - Convulsões; - Edemas; - Morte. |

Com o auxílio de um Banco de Dados com informações a respeito de quantas vezes os dispositivos de segurança entraram em operação durante um determinado período de tempo, pode-se montar uma tabela de categoria de frequência de ocorrência dos cenários, como exemplifica a Tabela 8.

Tabela 8 – Categoria de frequência de ocorrência dos cenários

| Categoria | Denominação | Frequência | Efeitos colaterais |
|------------------|---------------------|-------------------------|---|
| A | Extremamente remota | $f < 10^{-4}$ | Conceitualmente possível, mas improvável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação. |
| B | Remota | $10^{-4} < f < 10^{-3}$ | Não esperado ocorrer durante a vida útil do processo/instalação. |
| C | Improvável | $10^{-3} < f < 10^{-2}$ | Pouco provável de ocorrer durante a vida útil do processo/instalação. |
| D | Provável | $10^{-2} < f < 10^{-1}$ | Esperado ocorrer até uma vez durante a vida útil do processo/instalação. |
| E | Frequente | $f > 10^{-1}$ | Esperado de ocorrer várias vezes durante a vida útil do processo/instalação. |

Fonte: AGUIAR 2003

De posse das informações das duas tabelas anteriores constrói-se a Matriz de Riscos. Antes, porém, é preciso estabelecer uma classificação para os riscos que pode ser embasada em informações como, por exemplo, número de pessoas que podem ser afetadas, óbitos esperados, prejuízos financeiros que podem surgir com o evento, entre outras. Estabelecida as devidas tolerâncias, estrutura-se a matriz multiplicando as linhas pelas colunas, conforme pode ser visualizado na Tabela 9.

Tabela 9 – Exemplo de Matriz de Riscos

| Severidade | Frequência | | | | |
|-------------------|-------------------|-------------|-------------|----------|----------|
| | A | B | C | D | E |
| IV | Menor | Moderado | Sério | Crítico | Crítico |
| III | Desprezível | Menor | Moderado | Sério | Crítico |
| II | Desprezível | Desprezível | Menor | Moderado | Sério |
| I | Desprezível | Desprezível | Desprezível | Menor | Moderado |

➤ **Análise Preliminar de Perigos**

A Análise Preliminar de Perigos (APP) ou Análise Preliminar de Riscos (APR) ou, do inglês, *Preliminary Hazard Analysis* (PHA), é uma técnica que examina as maneiras pelas quais energia pode ser liberada de forma descontrolada, investigando as causas que podem levar a esta situação, bem como as consequências esperadas, sejam elas para as pessoas, meio ambiente ou as instalações físicas (FLEMING & GARCIA, 2010). A APP foi desenvolvida na década de 70 pela indústria militar norte-americana. Devido a sua estrutura, esta técnica permite reconhecer previamente os riscos, economizando tempo e gastos em replanejamentos. Por isso, rapidamente foi adaptada ao setor industrial (SILBERMAN & MATTOS, 2008; NUNES, 2002). Este tipo de abordagem pode ser empregado, tanto na fase de projeto, quanto na fase de operação (AGUIAR, 2010).

A Análise Preliminar de Perigos possui um formato padrão tabular onde todas as informações geradas são dispostas numa planilha. A Tabela 10 apresenta um exemplo de aplicação e a forma de construção de uma planilha APP. O resultado final desta metodologia consiste na identificação e análise dos cenários de riscos (FLEMING & GARCIA, 2010; CANGUSSÚ, 2007), a partir do qual a equipe envolvida elabora medidas de caráter preventivo e/ou mitigador (AICHE, 2000). Em comparação com a Matriz de Riscos, pode-se dizer que a APP é uma técnica mais elaborada. Aliás, a Matriz de Riscos está presente, mesmo que de forma disfarçada, dentro da planilha APP.

Tabela 10 – Exemplo de planilha APP

| Equipamento: Vaso extrator | | | | | | |
|-----------------------------------|------------------------------------|---|-------------------|------------------------|--------------|---|
| Perigo | Causa | Consequências | Frequência | Deteccão | Risco | Recomendações |
| Ruptura do vaso extrator | Excesso de pressão interna no vaso | Liberação de dióxido de carbono na área de processo | Provável | Indicadores de pressão | Sério | Instalar alarmes no equipamento para indicar a necessidade intervenção no sistema |

Fonte: Adaptado de AGUIAR (2010)

➤ Estudo de Perigos e Operabilidade

O Estudo de Perigos e Operabilidade ou, do inglês, *Hazard and Operability Study* (HAZOP), foi criado na década de 60 pela indústria química britânica *Imperial Chemical Industries* (ICI) para analisar fontes de perigos nas indústrias químicas e petroquímicas com o objetivo de eliminar fontes de perigos como, por exemplo, emissões tóxicas, explosões e incêndios (BENEDETTI, 2006). O HAZOP é uma técnica essencialmente indutiva que pode ser aplicado em processos contínuos, semi-contínuo ou batelada, tanto na fase de projeto quanto na fase de operação (PERRY *et al.*, 2008). Devido ao seu sucesso na identificação de riscos, sua aplicação se estendeu aos processos industriais, tais como, análise de medidas de segurança em sistemas rodoviários (JAGTMAN *et al.*, 2005) e navios (ZHAN *et al.*, 2009).

Dois conceitos merecem destaque nesta técnica. O primeiro conceito refere-se aos nós-de-estudo que são os pontos a serem investigados e, 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 compreende um grupo de palavras utilizadas para guiar o grupo de estudo durante a abordagem HAZOP. Essas palavras guias, quando combinadas com os parâmetros do processo, evidenciam os desvios operacionais (AGUIAR, 2010). Por exemplo, ao se aplicar à palavra-guia “mais” ao parâmetro “temperatura” identifica-se o desvio de operabilidade “superaquecimento”. Existe um conjunto padrão de palavras-guia, conforme pode ser visto no exemplo de aplicação demonstrado na Tabela 11. A escolha das palavras-guia dependerá do sistema em análise.

Tabela 11 – Tipos de desvios associados com as palavras-guia

| Palavras-guia | Significado |
|---------------------------|--|
| Não, nenhum | Negação do propósito do projeto. |
| Menos | Decréscimo quantitativo. |
| Mais | Acréscimo quantitativo. |
| Também, bem como, além de | Acréscimo qualitativo. |
| Parte de | Decréscimo qualitativo. |
| Reverso, ao contrário de | Oposição lógica do propósito do projeto. |
| Outro que não | Substituição completa. |

Fonte: <http://www.eps.ufsc.br>, 2010

Para aplicar a metodologia HAZOP na fase de projeto é imprescindível dispor dos fluxogramas de processo (*Process Flow Diagrams* - PF&D) e dos diagramas de tubulação e instrumentação (*Piping and Instrumentation Diagrams* - PI&D), de tal forma que o sucesso desta técnica reside na forma de avaliar minuciosamente estes materiais (DUNJÓ *et al.*, 2010). Na fase de operação, é necessário verificar se o PF&D e o PI&D estão atualizados, caso contrário a execução do HAZOP é simplesmente inútil (AGUIAR, 2010).

O Estudo de Perigos e Operabilidade estrutura-se numa planilha própria onde as palavras-guias são aplicadas aos parâmetros do processo para verificar desvios operacionais. A Tabela 12 fornece um exemplo de planilha HAZOP, bem como a descrição de como preenche-la. O HAZOP é muito mais do que uma ferramenta de segurança, uma vez que também resulta na melhor operacionalidade do processo ou da planta, o que pode significar uma maior rentabilidade. Normalmente, as recomendações sugeridas neste estudo estão na faixa de 40% para a segurança e 60% para questões de operabilidade (PERRY *et al.*, 2008).

Deve-se destacar também que nem todo desvio operacional é, necessariamente, uma fonte potencial de perigo. Isto ocorre, por exemplo, nos casos em que os parâmetros de processo não estão da maneira que deveriam estar, mas ao mesmo tempo, não comprometem a segurança do nó-de-estudo. É aconselhável que a técnica HAZOP seja complementada com outras mais elaboradas para ampliar e detalhar melhor o sistema sob investigação.

Tabela 12 – Exemplo de planilha HAZOP

| Nó-de-estudo: Vaso extrator | | | | | |
|------------------------------------|----------------|--|--------------------------|------------------------|--|
| Parâmetro: Pressão | | | | | |
| Palavra-Guia | Desvios | Causas | Consequências | Deteccção | Recomendações |
| MAIS | Sobrepessão | Entupimentos das linhas a jusante do vaso extrator | Ruptura do vaso extrator | Indicadores de pressão | Realizar manutenções periódicas das linhas |

Fonte: Adaptado de AGUIAR (2010)

➤ *Análise de Árvore de Eventos*

A *Análise de Árvore de Eventos*, do inglês *Event Tree Analysis* (ETA), é uma representação gráfica de uma possível sequência de eventos que pode acontecer num determinado sistema, após a ocorrência de um “evento-iniciador” (AMBROS, 2005). Consiste, portanto, num método indutivo que parte de uma argumentação específica para o geral, isto é, da causa para o efeito. Em inglês, este tipo de procedimento recebe o nome de *bottom-up*, da base para o topo.

O estudo de *Análise de Árvore de Eventos* se desenvolve da seguinte maneira: (i) identifica-se o evento inicial que pode ser obtido de outras técnicas como, por exemplo, *Análise Histórica de Acidentes*, TIC, etc; (ii) identificam-se as situações que se relacionam com o “evento-iniciador” e que podem produzir caminhos diferentes para o desenvolvimento da ocorrência, gerando, assim, diferentes consequências; (iii) constrói-se a árvore de eventos, onde o evento inicial é registrado do lado esquerdo e as interferências no topo, de acordo com a ordem cronológica. As linhas de interseção são traçadas fazendo as relações entre o evento inicial e as diversas interferências; (iv) por último, descreve-se os resultados que podem ocorrer em cada rama na árvore (NUNES, 2002).

A *Árvore de Eventos* fornece uma forma sistemática para identificar as várias sequências que conduzem à exposição potencial. Através desta metodologia é possível verificar a importância relativa das diversas sequências de falhas e identificar onde devem ser introduzidas novas salvaguardas para efetivamente alterar os estados finais.

Exemplo de aplicação:

Na Figura 16 é ilustrada uma *Árvore de Eventos*. O problema a ser evitado é a sobrepressão (Evento iniciador), pois a mesma pode causar a ruptura do vaso extrator. Suponhamos que o Sistema 1 da Figura 16 refere-se aos indicadores de pressão instalados no vaso extrator. O Sistema 2 representa os alarmes críticos também instalados no equipamento. E, finalmente, o Sistema 3 indica a presença de válvulas de segurança no vaso. Se, por algum motivo, a linha a jusante do vaso extrator for interrompida haverá um acréscimo da pressão interna do equipamento. Neste cenário, o Sistema 1 pode atuar, conforme o planejado (sucesso), ou não levando a um evento indesejado (falha 1). Para reforçar a segurança do processo, a falha 1 é prevista e instala-se no processo o Sistema 2 para chamar à atenção do operador de que algo está errado na planta (sucesso). No entanto, os alarmes podem não funcionar ou serem ignorados pelo operador (falha 2). Esta falha também é prevista e, diante

desta possibilidade, válvulas de segurança são instaladas no equipamento (Sistema 3) para liberar o excesso de pressão de forma automática (sucesso/Ok). Se, por alguma maneira, este último sistema falhar, então provavelmente ocorrerá à ruptura do vaso extrator (falha 3).

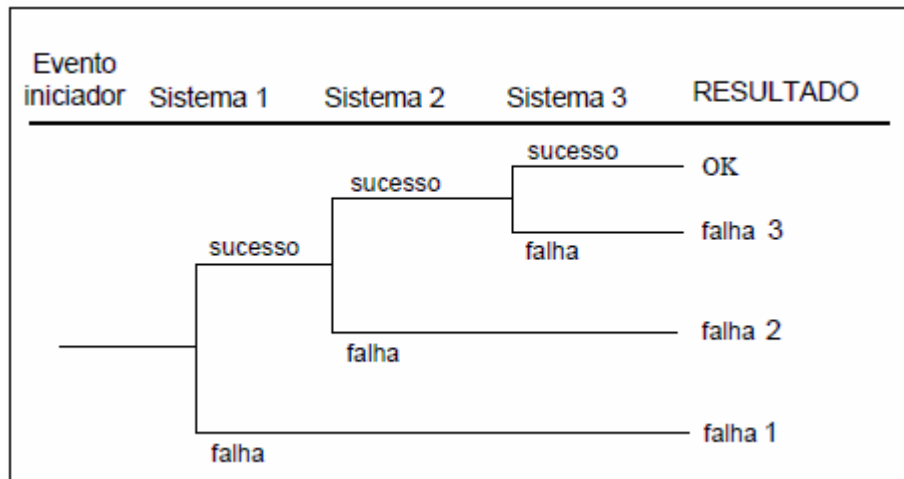
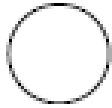


Figura 16 – Exemplo de uma Análise de Árvore de Eventos (Fonte: Adaptado de AMBROS, 2005)

➤ Análise de Árvore de Falhas

A Análise de Árvore de Falhas, do inglês *Fault Tree Analysis* (FTA) é uma representação gráfica que surgiu em 1961, a pedido da Força Aérea Americana, para avaliar os sistemas de controle do Míssil Balístico Minuteman. Suas premissas fundamentais são calcular as estimativas dos riscos, identificar as causas primárias das falhas, analisar a confiabilidade dos sistemas e solucionar problemas (BENEDETTI, 2006). A FTA é um modelo dedutivo que representa a combinação de falhas que precisam ocorrer para falhar a função ou o sistema de interesse (AMBROS, 2005). Em inglês, este tipo de procedimento é chamado de *top-down*, do topo para a base.

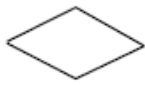
A Análise de Árvore de Falhas é estruturada num diagrama lógico que mostra as inter-relações entre um evento potencialmente crítico no sistema e as razões de sua ocorrência (CANGUSSÚ, 2007). Uma técnica muito utilizada no estudo FTA é a álgebra Booleana que permite quantificar a análise com o uso de regras e símbolos matemáticos simples, onde é possível expressar as condições existentes em dois valores, tais como: “sim ou não”, “falso ou verdadeiro”, “alto ou baixo”, “O (zero) ou 1 (um)”, etc (CASTELLAR, 2010). Os principais símbolos que aparecem numa FTA são:



Evento básico: descreve a falha inicial, cujo limite apropriado de resolução tem sido alcançado. Representa o final do processo de análise dedutiva, formando, assim, a base da FT.



Evento condicionante: registra qualquer condição ou restrição a qualquer porta lógica. Normalmente é usado com a porta “Inibidora” e “É Prioritário”.



Evento não desenvolvido: descreve os eventos para o qual o analista não tem interesse em continuar o processo dedutivo, seja porque as causas do evento decorrem de falhas de componentes situados fora da fronteira definida para a análise, ou porque aquele evento já foi analisado em uma FT à parte.



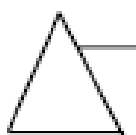
Evento externo: significa um evento que é Normalmente esperado de ocorrer, mas não representa falha.



Evento intermediário: ocorrem porque uma ou mais causas antecedentes agem através das portas lógicas.



Eventos de transferência para dentro: símbolo indicando que a árvore será desenvolvida posteriormente no correspondente símbolo de transferência para fora.



Evento de transferência para fora: símbolo indicando que esta parte da árvore deverá ser anexada ao correspondente símbolo de transferência para dentro.



Porta OU: o evento de saída ocorre somente se um ou mais dos eventos de entrada ocorrem.



Porta OU EXCLUSIVO: é uma porta OU especial onde o evento de saída ocorre somente se exatamente um dos eventos de entrada ocorrer.



Porta E: o evento de saída ocorre somente se todos os eventos de entrada ocorrem.

Exemplo de aplicação:

A Figura 17 ilustra uma Árvore de Falhas para um “evento-topo” (situação a ser evitada) do tipo: liberação de dióxido de carbono numa planta industrial de extração supercrítica. No primeiro nível hierárquico da árvore estão dispostos dois eventos intermediários que poderiam causar o “evento-topo” que são a abertura das válvulas de segurança e a ruptura do vaso extrator. Para cada uma desta situação existem novos eventos intermediários associados como, por exemplo, corrosão, fratura e fadiga, que poderiam levar a ruptura do vaso extrator. Já para a abertura das válvulas de segurança, pode-se atribuir como causas intermediárias os problemas de caráter estrutural (válvulas danificadas) ou a própria sobrepressão do vaso. Analisando especificamente a sobrepressão, dois novos eventos iniciadores podem ser identificados: o entupimento das linhas a jusante do equipamento ou o aumento excessivo da temperatura. Se focarmos nossa atenção para este último evento, encontramos como causa básica os problemas decorrentes no trocador de calor, que poderia provocar o aquecimento excessivo do meio, aumentando a pressão de vapor das substâncias presentes no interior do vaso extrator e, conseqüentemente, a pressão interna.

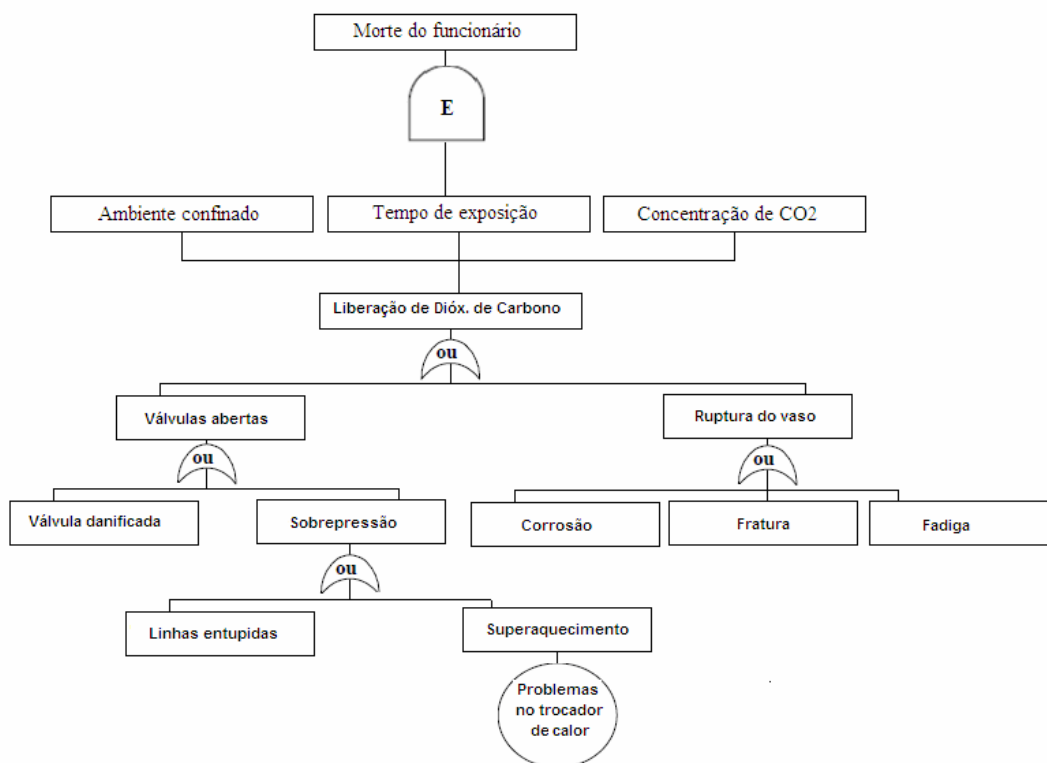


Figura 17 – Fluxograma de uma Árvore de Falhas (Fonte: DIAS, 2010)

Uma das grandes vantagens desta ferramenta consiste no fato da Análise de Árvore de Eventos permitirem uma avaliação qualitativa e quantitativa, pois para cada porta lógica é atribuída uma operação matemática como mais, menos, vezes, etc. Exemplos mais específicos deste algebrismo podem ser encontrados em BENEDETTI (2006).

Em contrapartida existem duas preocupações básicas. A primeira consiste na forma de mensurar a probabilidade de ocorrência de falha do sistema. Normalmente os métodos de cálculo exato utilizados para isto requerem, em geral, algoritmos muito complexos que podem comprometer a eficiência computacional ou dedutiva. A segunda está no fato em se estabelecer os cortes mínimos da árvore, ou seja, como determinar se um conjunto de eventos básicos, de fato, implica na ocorrência do evento topo. Portanto, é aconselhável que este tipo de metodologia não seja utilizado para sistemas muito complexos onde há muitos componentes interagindo uns com os outros.

➤ Análise de Efeitos e Modo de Falha

A Análise de Efeitos e Modo de Falha ou, do inglês *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) surgiu, por volta de 1949, para análise de falhas no sistema aeroespacial norte-

americano (BENEDETTI, 2006). Na década de 60, esta metodologia foi aprimorada pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e, desde 1976, vem sendo muito difundida no ramo automobilístico (BASTOS, 2006). Também já foi testado em outros setores como, por exemplo, nas indústrias de brinquedos (HSIAO, 2002), serviços hospitalares (PAPARELLA, 2007; TRUCCO & CAVALLIN, 2006; REID, 2005; REILING *et al.*, 2003; SPATH, 2003), sistemas agroindustriais (ROSA & GARRAFA, 2009; BERTOLINI *et al.*, 2006), em estratégia de terceirização (WELBORN, 2007), entre outras. Esta técnica é mais utilizada para analisar o modo de falha em instrumentos de medição (indicadores de pressão, temperatura, nível, etc), de segurança (válvulas), bombas, compressores, filtros e etc (SIVINI, 2006).

O FMEA é uma técnica indutiva que permite analisar como podem falhar os componentes de um sistema e como estas falhas se propagam ao longo de todo o sistema (CHIN *et al.*, 2009; NUNES, 2002). Dentre os principais modos de falha a serem analisados numa abordagem FMEA estão falhas devido: (i) ao projeto incorreto ou inadequado; (ii) ao método de fabricação e montagem incorreta; (iii) a uma gestão de má qualidade; (iv) a um funcionamento incorreto; (v) aos aspectos de segurança no projeto, etc (HSIAO, 2002).

O FMEA parte do pressuposto de que todos os erros são evitáveis e previsíveis (PAPARELLA, 2007). Assim, é possível definir, identificar e eliminar falhas potenciais de sistemas, projetos, produtos e serviços (CAMPOS *et al.*, 2008), além de melhorar a alocação de recursos e, também, organizar melhor a forma de documentar os modos e os efeitos de falhas (MIGUEL & SEGISMUNDO, 2008). Pode-se descrever o FMEA com um método disciplinado, sistemático e nativo da área de engenharia, concebido para destacar as consequências não intencionais de todos os aspectos de um sistema (*design*, processo, serviço, produto, etc), com o objetivo de neutralizar ou eliminar a ocorrência de quaisquer consequências indesejadas, culminando com o sucesso crescente da qualidade.

A metodologia é caracterizada por uma abordagem que quebra qualquer sistema em seus componentes fundamentais para detectar todos os possíveis modos de falha e seus efeitos. Basicamente, a técnica consiste em dois estágios. No primeiro estágio, possíveis modos de falhas e seus efeitos são identificados. No segundo estágio, avaliam-se o nível de crítico dessas falhas. A falha mais crítica será a primeira do ranking, e será considerada prioritária para a aplicação de ações de melhoria (BERTOLINI *et al.*, 2006). A Tabela 13 demonstra um exemplo desta planilha, bem como o seu preenchimento.

A criticidade do risco é dada conforme os dados de ocorrência (O), severidade (S) e detecção (D), de tal maneira que a multiplicação destas três variáveis fornece o Número de Prioridade de Risco (*Risk Priority Number* - NPR). Exemplos de NPR podem ser vistos nos trabalhos de CHIN *et al.* (2009), ROSA & GARRAFA (2009), CAMPOS *et al.* (2008), BERTOLINI *et al.* (2006), MCCAIN (2006) e REID (2005).

Embora o NPR seja uma forma de quantificar o risco, há muitas controvérsias quanto a sua utilização. Os principais pontos a serem abordados são: (i) não há uma regra algébrica que determine uma pontuação precisa para o Número de Prioridade de Risco; (ii) diferentes pontuações para ocorrência, severidade e detecção podem resultar no mesmo valor de NPR, ainda que o risco envolvido seja completamente diferente e; (iii) o NPR não consegue mensurar a efetividade das ações de melhoria propostas ao final do estudo FMEA (ROSA & GARRAFA, 2009; MIGUEL & SEGISMUNDO, 2008; LEAL *et al.*, 2006).

Tabela 13 – Preenchimento da planilha FMEA

| Sistema: Válvula de segurança instalada no vaso extrator | | | | | | | | |
|---|----------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------|---|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|
| Função | Modo de Falha | Efeitos | Causas | Severidade | Ocorrência | Deteção | NPR | Recomendações |
| Aliviar o excesso de pressão | Falha em manter-se fechada | Liberação de dióxido de carbono | Perda da propriedade elástica da mola | Crítica | Deve-se estimar a probabilidade de falha ou obtê-la em banco de dados | Indicadores de pressão | Deve-se calcular o valor NPR | Manutenção periódica das válvulas |

Fonte: Adaptado de <http://www.systems2win.com>, 2010

➤ **Análise das Camadas de Proteção**

A Análise das Camadas de Proteção, do inglês *Layers of Protection Analysis* (LOPA) é uma técnica semi-quantitativa de Análise de Riscos. Sua finalidade é determinar se existem camadas de proteção suficientes para fazer frente a um cenário de risco específico. As camadas de proteção podem ser entendidas como um sistema, dispositivo ou ação com a capacidade de impedir a ocorrência das consequências de um cenário de risco específico, utilizadas para proteger as instalações físicas e, principalmente, as pessoas (BAUM *et al.*, 2009; MOSTIA, 2009; DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006).

Um cenário de risco pode demandar uma ou diversas camadas de proteção, dependendo da complexidade do processo e da severidade de suas consequências (ALVES, 2007). Obviamente que, quanto maior o número de camadas de proteção, maior será o nível de segurança de uma planta industrial e, em contrapartida, maiores serão os gastos com segurança. O ideal é sempre buscar um máximo de proteção para um mínimo de investimentos (PERRY *et al.*, 2008; ALMEIDA, 2007).

Diz-se que as camadas de proteção presentes numa instalação industrial determinam o nível de integridade segura do sistema (do inglês, *Safety Integrity Levels* - SIL) que, em linhas gerais, informa o quão protegido aquela instalação está frente a um cenário de risco específico. O nível de integridade segura assume um valor numérico baseado na probabilidade de uma determinada camada de proteção não cumprir com sua função. Esta probabilidade de falha também é conhecida como probabilidade de falha na demanda – PFD (ALMEIDA, 2007).

Os níveis de integridade segura são descritos por faixas de probabilidade de falhas que, Normalmente, varia da seguinte maneira: SIL 4 ($10^{-5} < \text{PFD} > 10^{-4}$), SIL 3 ($10^{-4} < \text{PFD} < 10^{-3}$), SIL 2 ($10^{-3} < \text{PFD} < 10^{-2}$) e o SIL 1 ($10^{-2} < \text{PFD} < 10^{-1}$). Neste panorama, o mais alto nível de integridade e, obviamente o mais oneroso de se alcançar, corresponde ao SIL 4 (BAYBUTT, 2002). Níveis inferiores ao SIL 1 indicam que o equipamento não é relevante para a segurança do processo. A Norma IEC-1508 publicada pela Comissão Eletrotécnica Internacional (*International Electrotechnical Commission*) fornece as diretrizes para a quantificação do SIL, servindo de ótima referência.

Na técnica LOPA, as camadas de proteção são classificadas em salvaguardas e camadas de proteção independentes (do inglês *Independent Protection Layers* - IPL). A diferença básica entre elas está no fato da salvaguarda, ao contrário das camadas de proteção independentes, não ser capaz de detectar uma condição que exige a sua ação e, também, não

ser capaz de impedir que a consequência indesejada ocorra. Por isso, diz-se que qualquer camada de proteção independente é uma salvaguarda, mas nem toda salvaguarda é uma camada de proteção independente (BAUM *et al.*, 2009; MOSTIA, 2009; DZIUBIŃSKI *et al.*, 2006).

Geralmente, a Análise das Camadas de Proteção é aplicada após uma análise qualitativa para que os cenários de riscos previamente identificados pela equipe possam ser aproveitados (VASCONCELOS, 2008). Neste sentido, um tipo de abordagem muito utilizado no setor industrial é a integração da técnica qualitativa HAZOP como a técnica LOPA (BAUM *et al.*, 2009; MURPHY *et al.*, 2009). Para se ter uma ideia, em 2006 este tipo de abordagem, associada à técnica HAZOP, correspondia a 10% dos estudos de segurança no setor industrial; em 2007 passou para 25% e; em 2008, ultrapassou a marca dos 80% (BAUM *et al.*, 2009).

Dentro da estrutura da técnica LOPA existem oito tipos de camadas de proteção que podem ser utilizadas para aumentar o seu nível de segurança num processo industrial (VASCONCELOS, 2008; ALVES, 2007; BAYBUTT, 2002), conforme pode ser visualizado na Figura 18. Garantir a integridade física de um equipamento é o primeiro passo para a Segurança de Processos. Neste sentido, a primeira camada de proteção refere-se aos dados de projeto que compreende a escolha do melhor *design* e *layout* do equipamento. Qualquer material de construção, independente do tipo de equipamento, precisa suportar determinadas condições operacionais e sua localização deve ser de tal maneira que num eventual cenário de risco como, por exemplo, numa explosão, os demais equipamentos não sejam afetados.

A segunda camada corresponde ao Sistema Básico de Controle, constituída pelos medidores de pressão, temperatura, nível, vazão, concentração, etc. Este sistema tem como função primordial o controle do processo, de forma a permitir a otimização da produtividade industrial, estruturada na diminuição dos custos de produção, melhoria na qualidade dos produtos, precisão nas operações e segurança, entre outros diversos benefícios.

A terceira camada de proteção são os alarmes críticos. Estes alarmes indicam a necessidade de intervenção humana no sistema, que pode ser automatizada ou manual. Sistemas de alarmes são importantes ferramentas para monitorar automaticamente a planta, atraindo a atenção do operador para mudanças significativas que requerem a avaliação da situação e alguma ação corretiva. Estes sistemas devem apontar, apenas, situações críticas, evitando a sobrecarga de informações e, conseqüentemente, a perda de confiabilidade do

sistema por parte do operador. Também é de suma importância diferenciar os alarmes de acordo com os eventos, a fim de informar o tipo de ação a ser efetuada no sistema.

A quarta camada de proteção é constituída pelo Sistema Instrumentado de Segurança (SIS) que implementa funções capazes de detectar condições operacionais anormais e efetuar ações corretivas para trazer o processo novamente ao estado seguro. Esta camada de proteção é formada pelos sensores, controladores, programadores, etc. A diferença entre o Sistema Instrumentado de Segurança e o Sistema Básico de Controle está no fato deste último monitorar continuamente as variáveis do processo, mas não ser capaz de atuar no sistema de forma a impedir uma condição anormal.

A quinta camada de proteção compreende os dispositivos de segurança que são os componentes cuja função é aliviar automaticamente, sem intervenção do operador, a pressão do vaso, independentemente das causas que provocaram a sobrepressão. Embora o termo dispositivo de segurança seja usado de forma generalizada em plantas industriais, há uma diferença básica que precisa ser esclarecida. Os dispositivos de segurança aplicados para fluidos compressíveis são conhecidos como PSV (*Pressure Safety Valve*) e atuam no sistema aliviando a pressão de forma rápida. Já os dispositivos de segurança aplicados para fluidos incompressíveis são chamados de PRV (*Pressure Relief Valve*) e aliviam a pressão de forma proporcional. Esta diferença implica diretamente na forma de dimensioná-los (API, 2002). A sexta camada de proteção é composta pelos dispositivos passivos. Estes dispositivos são instalados levando-se em consideração que as demais camadas de proteção podem, por alguma maneira, falhar no desempenho de suas funções. Esta camada é formada pelas barreiras de contenção, telas de proteção, diques, armadilhas, entre outros dispositivos. Sua função é impedir que o evento indesejado atinja outros ambientes da planta e a comunidade externa.

A sétima camada de proteção é formada pelas respostas de emergência da planta. Ela compreende os planos de evacuação da área ou, dependendo da situação, os planos de confinamento. Este tipo de proteção informa o que deve ser feito, pelas pessoas presentes na planta industrial, no momento do acidente e envolve, portanto, a disciplina de se preparar para o desastre antes que o mesmo aconteça.

A última camada de proteção diz respeito às respostas de emergência da comunidade. Inclui a mobilização necessária dos serviços de primeiros socorros como, por exemplo, grupos de bombeiros, polícias, ambulâncias e outros serviços especializados. Independente do

grupo envolvido na situação, o foco deste tipo de resposta é sempre auxiliar, de forma rápida, a população afetada.

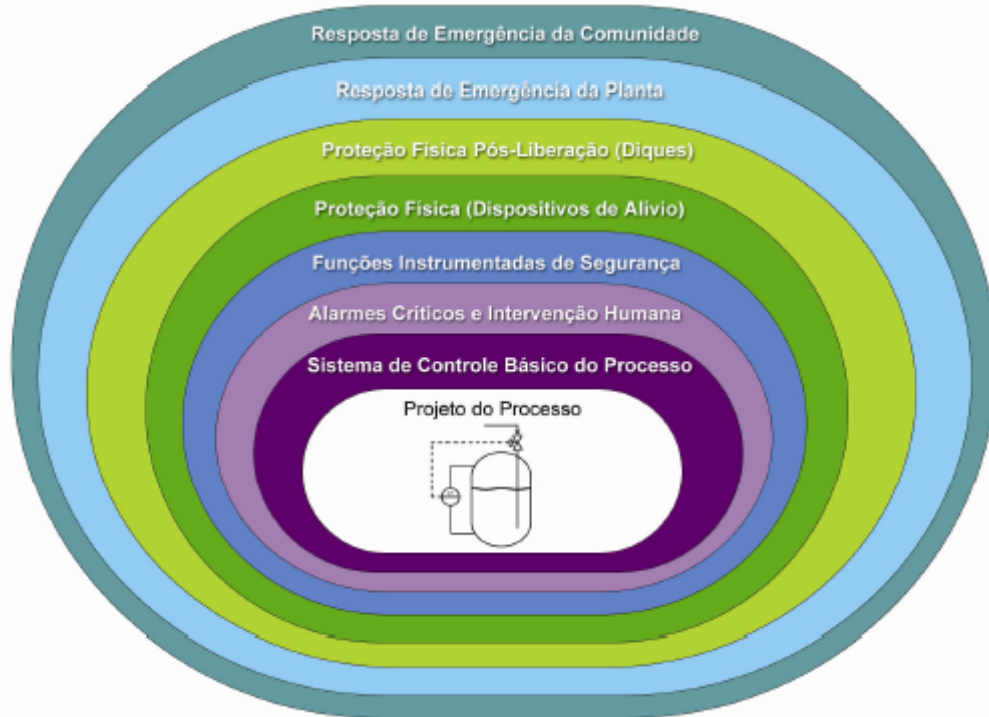


Figura 18 – Exemplos de camadas de proteção (Fonte: ALVES, 2007)

A aplicação da técnica LOPA ocorre da seguinte maneira: (i) identifica-se as consequências para montar o cenário de risco; (ii) desenvolve-se os cenários de acidentes, de tal forma que cada cenário deve ter, apenas, um par “evento-iniciador” e uma consequência. Uma vez que o “evento-iniciador” é identificado, o analista deve verificar se é necessário algum “evento-habilitador” para que o “evento-iniciador” conduza à consequência; (iii) estima-se a frequência do “evento-iniciador” que é, Normalmente, expressa em eventos por ano; (iv) identifica-se as camadas de proteção independentes, verifica-se se elas operam como planejado e estima-se a probabilidade de falha na demanda; (v) o cenário de risco identificado e as camadas de proteção independentes são utilizados para calcular a frequência do cenário e mitigado. Para isso, combina-se a frequência do “evento-iniciador” com a probabilidade de falhas na demanda e a frequência da consequência esperada; (vi) avalia-se os cenários de riscos para as tomadas de decisão (ALVES, 2007). Um exemplo de aplicação desta técnica é apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 – Exemplo para documentação e cálculos da técnica LOPA

| Cenário de Risco Específico: Ruptura do vaso extrator | | |
|--|--|----------------------------------|
| | Descrição | Frequência |
| Consequência | Ruptura do vaso extrator com liberação de material na área de processo | |
| Evento-iniciador | Sobrepresão causada pelo excesso de temperatura decorrente da perda de controle do trocador de calor | $x \text{ ano}^{-1}$ |
| IPL's | Detecção automática + supressão manual (operador) | $y \text{ (PFD)}$ |
| Frequência da consequência mitigada | | $z \text{ ano}^{-1} (z = y - x)$ |
| Critério de tolerância do risco é atendido? (Sim ou Não) | | Não há critério |
| Ações necessárias para redução do risco: <ul style="list-style-type: none"> - Instalar alarmes na planta para identificar o aumento de pressão no vaso extrator; - Estruturar planos de evacuação da área em caso de ruptura; - Dispor de instrumentos que indiquem alterações nos parâmetros do trocador de calor, etc. | | |

Fonte: Adaptado de ALVES (2007)

CAPÍTULO 4

DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo descreve a metodologia utilizada nesta pesquisa para identificar e analisar de forma crítica as camadas de proteção preconizadas pela Norma NR 13, bem como a discussão dos resultados obtidos.

4.1 Escolha da Técnica de Análise de Riscos

Baseado no fato de que, mesmo aplicando a Norma NR 13 em sua plenitude, ainda assim ocorrem acidentes envolvendo vasos de pressão, a pergunta a ser respondida é: será que a Norma NR 13 é suficiente para realmente evitar acidentes envolvendo vasos de pressão numa instalação supercrítica? Uma proposta para responder a esta questão é comparar qualitativamente os preceitos da Norma NR 13 com os resultados fornecidos por uma técnica específica de Análise de Riscos.

Assim, a primeira etapa da metodologia aplicada compreende escolher qual técnica de Análise de Riscos deve ser empregada para verificar, de forma qualitativa, o nível de segurança fornecido pela Norma NR 13. Conforme visto no capítulo anterior, existem técnicas de Análise de Riscos que fornecem resultados qualitativos, semi-quantitativos e quantitativos. A escolha da técnica irá depender de fatores como, por exemplo, custo de aplicação, disponibilidade de tempo e objetivos com a análise.

Diante destes fatores, desprezou-se, inicialmente, as técnicas quantitativas e semi-quantitativa de Análise de Riscos abordadas neste trabalho. Isto porque, o tempo de aplicação e o custo destas técnicas são maiores quando comparados com as técnicas qualitativas. Além disso, o resultado pretendido é avaliar qualitativamente o nível de segurança fornecido pela Norma NR 13. Um resumo das características levadas em consideração para a escolha do grupo das técnicas qualitativas pode ser visualizado na Tabela 15.

Tabela 15 – Comparação entre as técnicas de Análise de Riscos

| Características | Técnicas de Análise de Riscos | | |
|---------------------------|--------------------------------------|----------------------------|----------------------|
| | Qualitativas | Semi-quantitativa | Quantitativas |
| Custo | Menor | Intermediário | Maior |
| Tempo de aplicação | Pequeno | Intermediário | Grande |
| Resultados | 100% Qualitativa | Qualitativa e Quantitativa | 100% Quantitativa |

Dentro das características abordadas nesta pesquisa referentes às técnicas qualitativas apresentadas, alguns fatores puderam ser identificados e classificados como complicadores para atingir o objetivo proposto. Neste cenário, para aplicar a Análise Histórica de Acidentes, por exemplo, é imprescindível dispor de um Banco de Dados com informações a respeito de falhas em vasos de pressão, mais especificamente em plantas industriais de extração supercrítica. Este tipo de informação não foi encontrado durante o desenvolvimento desta pesquisa, impossibilitando o uso desta técnica.

Em relação à Técnica dos Incidentes Críticos, sua aplicação só é possível a partir do momento em que se tenha algum tipo de vínculo com uma indústria de extração supercrítica. Somente assim é possível aplicar a “técnica do confessor”. Entretanto, no Brasil ainda não existe nenhuma instalação industrial de extração supercrítica e, portanto, não foi possível aplicar esta técnica de Análise de Riscos.

A análise *What If*, a Matriz de Riscos e a Análise Preliminar de Perigos necessitam de um grupo multidisciplinar de estudo, de informações a respeito das probabilidades de falhas do equipamento e da severidade dos efeitos esperados. Este tipo de abordagem dificultou a sua aplicação, mesmo porque para estimar a categoria de riscos é preciso de informações a respeito da aceitabilidade do risco. Não é objetivo deste trabalho resolver estas questões.

O *Checklist* carece de outra técnica qualitativa. Partindo deste princípio é inviável utilizá-lo nesta pesquisa, pois o tempo de aplicação seria maior, quando comparado com a utilização de uma única técnica de Análise de Riscos.

A ferramenta HAZOP, por sua vez, necessita dos fluxogramas de processos ou, pelo menos, de simuladores específicos para criar um fluxograma de processo e verificar a consistência do projeto. Para o objetivo deste trabalho não caberia aplicar esta ferramenta.

Um resumo dos principais problemas encontrados nas técnicas qualitativas de Análise de Riscos mencionada é apresentado na Tabela 16.

Tabela 16 – Problemas que dificultam a aplicação das técnicas qualitativas

| Técnica | Desvantagens |
|--|--|
| Análise Histórica de Acidentes | - Necessita de Banco de Dados. |
| Técnica dos Incidentes Críticos | - Necessita de vínculo com a indústria. |
| <i>What If</i> | - Envolve grupo multidisciplinar; |
| Análise Preliminar de Perigos – APP | - Necessita da probabilidade de falhas; |
| Matriz de Riscos | - Necessita da severidade das consequências. |
| <i>Checklist</i> | - Necessita de outra técnica. |
| Estudo de Perigos e Operabilidades – HAZOP | - Necessita dos fluxogramas de processo. |

Frente às dificuldades apresentadas anteriormente, optou-se por utilizar a técnica de Análise das Camadas de Proteção (LOPA) que é uma ferramenta semi-quantitativa e antecede uma técnica puramente quantitativa. Porém, esta metodologia envolve a determinação da Probabilidade de Falha na Demanda (PFD) que necessita de certa quantificação, não sendo foco deste trabalho. Desta maneira, pensou-se em desprezar toda a parte quantitativa da técnica LOPA, adaptando esta ferramenta as necessidades da pesquisa.

Assim, sem a parte quantitativa, a Análise das Camadas de Proteção se torna uma ferramenta de Análise de Riscos exclusivamente qualitativa, apresentando as mesmas vantagens destas, que pode ser vista na Tabela 15. Desta maneira, optou-se por utilizar somente as camadas de proteção utilizadas pela técnica LOPA para avaliar qualitativamente o nível de segurança fornecido pela Norma NR 13.

4.2 Identificação das Camadas de Proteção Preconizadas pela NR 13

Escolhida a técnica LOPA como ferramenta a ser utilizada, a próxima etapa da metodologia é a identificação de quais itens da Norma NR 13 podem ser enquadrados como camadas de proteção, comparando-os com as informações intrínsecas da Figura 18. Além de informações presentes na estrutura do documento, admitiu-se também a possibilidade da Norma NR 13 referenciar outros documentos. Neste caso, este novo documento será pesquisado e, se puder ser enquadrado na camada de proteção avaliada, então o item da Norma NR 13 que o faz menção será considerado satisfatório.

Feito estas observações, através da leitura crítica da Norma NR 13 pode-se identificar que os 13.6, 13.9, 13.7 e 13.10 podem se enquadrados na primeira camada de proteção. A segunda camada de proteção está referenciada nos itens 13.6.2.c, 13.7.1, 13.8.2 e 13.8.2.1. O item 13.7.2.e pode ser enquadrado na terceira camada de proteção. Não há nenhum item, subitem, ou mesmo uma referência, na Norma NR 13 que permite dizer que a quarta camada de proteção é abordada. Informações da quinta camada de proteção são presenciadas nos itens 13.6.2.a e 13.6.2.b. Não há nenhum item na Norma NR 13 que possa ser enquadrado na sexta camada de proteção. A sétima camada de proteção está referenciada nos itens 13.8.1.c e 13.8.3. Não há nenhum item na Norma NR 13 que possa ser enquadrado na oitava camada de proteção. Um resumo das camadas de proteção preconizadas pela Norma NR 13 é apresentado na Tabela 17. A Norma NR 13, que cabe a parte de vasos de pressão, pode ser consultada nos Anexos I, II e III.

Tabela 17 – Problemas que dificultam a aplicação das técnicas qualitativas

| Nº | Camada | NR 13 | LOPA |
|----|---------------------------------------|-------|------|
| 1 | Projeto do Equipamento | ✓ | ✓ |
| 2 | Controle Básico de Processo | ✓ | ✓ |
| 3 | Alarmes Crítico | ✓ | ✓ |
| 4 | Funções Instrumentadas de Segurança | ✗ | ✓ |
| 5 | Dispositivos de Alívio | ✓ | ✓ |
| 6 | Barreiras de Contenção | ✗ | ✓ |
| 7 | Respostas de Emergência da Planta | ✓ | ✓ |
| 8 | Respostas de Emergência da Comunidade | ✗ | ✓ |

4.3 Discussão dos Resultados

A Norma NR 13 não apresenta em seu escopo a expressão camadas de proteção. No entanto, uma leitura crítica deste documento, a luz das camadas de proteção abordadas pela técnica LOPA, é possível identificar algumas dessas camadas e fazer comentários pertinentes a respeito delas. Por exemplo, diante do fato de que o primeiro passo para a segurança de uma instalação supercrítica é o *design* e *layout* dos equipamentos presentes, pode-se dizer que a primeira camada de proteção é plenamente abordada pela Norma NR 13. O item 13.6 auxilia

no *design* do vaso de pressão, pois, segundo este item, os vasos de pressão devem ser dimensionados considerando-se a condição de pressão mais severa. Se admitirmos que a identificação do equipamento através de pinturas, adesivos, placas, etc, também fazem parte do *design* e, que os procedimentos de inspeção e manutenção auxiliam no perfeito funcionamento do equipamento, então os itens 13.9 e 13.10 da Norma NR 13 também podem ser enquadrados na primeira camada de proteção. Além disso, a Norma NR 13 faz referência ao código ASME que, por sua vez, especifica as regras para construção de vasos de pressão.

Em relação ao *layout* do vaso, a Norma NR 13 dispõe o item 13.7 o qual estabelece que todo vaso de pressão deve ser instalado de modo a evitar que, ocorrendo um vazamento, incêndio ou qualquer outra possibilidade de risco aos operadores, estes não fiquem cercados pelo fogo ou vazamento, dispondo sempre de uma rota de fuga alternativa. Em outras palavras, o local para instalação do equipamento deve ser de fácil acesso.

➤ Segunda camada de proteção

Em plantas de extração supercrítica, o uso de indicadores de pressão, nível e temperatura são de especial importância, pois permitem o controle do processo, seja em termos de qualidade do produto, ou em relação à própria segurança. A segunda camada de proteção é abordada pela Norma NR 13 no subitem 13.6.2.c o qual informa que constitui risco grave e iminente a falta de indicador de pressão em vasos de pressão. Também prevê o uso de indicadores de nível e temperatura no subitem 13.7.1e e informa que todos os instrumentos de controle devem ser calibrados e mantidos em boas condições, conforme prescreve o subitem 13.8.2. Ainda, de acordo com o subitem 13.8.2.1, menciona que constitui condição de risco grave e iminente o emprego de artifícios que neutralizem estes sistemas de controle. Por fim, a Norma NR 13 menciona que a periodicidade de manutenção e a definição de quais instrumentos de controle é responsabilidade de profissionais legalmente habilitados para cada especialidade.

➤ Terceira camada de proteção

Diante da possibilidade de uma eventual explosão do vaso extrator frente a uma sobrepressão, por exemplo, é imprescindível a presença da terceira camada de proteção. Neste sentido, o único item da Norma NR 13 que faz referência a esta camada é o 13.7.2.e. Este item menciona que o vaso de pressão deve possuir iluminação de emergência para que o equipamento, nos casos de falha no fornecimento de energia elétrica, esteja adequadamente

iluminado. Note que, embora este tipo de dispositivo possa ser enquadrado como alarme, pois alerta o operador para o evento falta de energia na planta, também poderia ser enquadrado na primeira camada de proteção, uma vez que indica a posição do equipamento (*layout*). Deve-se tomar cuidado ao classificar este item como alarme crítico e, para instalações supercríticas, adotar outros dispositivos de forma paralela como, por exemplo, alarmes sonoros. Estes dispositivos atuariam sempre que desvios operacionais fossem presenciados e alertariam ao operador para uma eventual intervenção no sistema.

➤ Quarta camada de proteção

A quarta camada de proteção é muito importante numa instalação supercrítica por causa dos altos valores de pressão envolvidos. Se, por algum motivo, os alarmes críticos forem ignorados ou não notados pelos operadores, esta camada de proteção atuaria no sentido de levar o processo novamente a uma situação de segurança. Entretanto, não há nenhum item da Norma NR 13 que pode ser enquadrado nesta camada de proteção.

➤ Quinta camada de proteção

A quinta camada de proteção merece uma atenção especial dentro de uma instalação supercrítica, seja ela industrial, piloto ou mesmo laboratorial, pois pode significar a última proteção que impediria a explosão do vaso extrator por excesso de pressão. Neste sentido, a Norma NR 13 apresenta os itens *13.6.2.a* e *13.6.2.b* que constitui risco grave e iminente a falta de válvula ou qualquer outro dispositivo de segurança que têm por objetivo impedir que a pressão interna do vaso atinja valores que comprometam sua integridade física.

➤ Sexta camada de proteção

Mesmo que as camadas de proteção mencionadas anteriormente estejam presentes numa planta industrial de extração supercrítica, ainda assim é preciso dispor de barreiras de contenção, partindo-se da hipótese de que existe a possibilidade das camadas de proteção, anteriormente mencionadas, falharem. No entanto, não há nenhum item da Norma NR 13 que pode ser enquadrado na sexta camada de proteção.

➤ Sétima camada de proteção

A sétima camada de proteção é representada pelos planos e organizações de combate a emergências que visam minimizar os impactos do acidente através de ações internas.

Compreende os planos de evacuação ou, dependendo da situação, de confinamento frente a um cenário de riscos. A Norma NR 13 aborda esta camada de proteção no item 13.8.1.c onde informa que todo o vaso de pressão deve possuir manual com procedimentos para situações de emergência. Também o faz no item 13.8.3 ressaltando a importância do operador responsável pela operação da unidade ser capaz de atuar prontamente para corrigir situações anormais que se apresentem. A Norma NR 23 poderia atuar de forma paralela a Norma NR 13, pois fornece informações a respeito de como a planta deve se comportar na presença de focos de incêndios.

➤ Oitava camada de proteção

A última camada de proteção é representada pelos planos que envolvem remoção, atendimento e resgate após o acidente. Esta camada de proteção é de grande valia, pois pode representar a última chance de sobrevivência de uma pessoa que esteja presente no ambiente no momento do acidente. Apesar desta importância, a Norma NR 13 não faz nenhum comentário que possa ser enquadrado nesta camada.

A Figura 19 ilustra a situação atual da Norma NR 13 com foco nas oito camadas de proteção abordadas num estudo LOPA. As regiões verdes indicam que a Norma NR 13 atende às perspectivas da camada de proteção avaliada. A região na cor amarela indica uma situação de alerta. Ou seja, embora a Norma NR 13 faça referência a esta camada, é preciso que informações adicionais sejam implementadas para atender plenamente a função da camada de proteção avaliada. As regiões de cor vermelha indicam camadas de proteção que não são abordadas pela Norma NR 13. Para demonstrar os efeitos da falta destas camadas, pode-se fazer uma análise qualitativa do seguinte evento:

Suponhamos que o vaso extrator presente numa instalação supercrítica sofre um desvio operacional e sua pressão interna aumenta consideravelmente e de forma ininterrupta. Neste cenário de risco específico, os dados de projeto para construção do vaso extrator atuam de forma a suportar a maior variação de pressão possível (1º Camada de Proteção). A presença de medidores de pressão auxiliaria os operadores a perceber que a pressão interna do equipamento está subindo substancialmente e, portanto, é necessária uma atenção especial ao processo (2º Camada de Proteção). Como os medidores de pressão não são capazes de levar o sistema a um estado seguro, e a pressão continua subindo, as válvulas de segurança entram em operação (5º Camada de Proteção). Note que duas camadas de proteção não atuam

neste evento. Uma porque não houve falta de luz, assim o alarme de iluminação não entra em operação. A outra porque não é abordada pela Norma NR 13. Se ainda assim a pressão continuar subindo, então os planos de evacuação devem ser colocados em prática (7º Camada de Proteção). Observe que até a evacuação da área o equipamento pode desprender fragmentos e atingir pessoas e os demais equipamentos instalados no processo, o que poderia ser evitado na presença da sexta camada de proteção.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA OS TRABALHOS FUTUROS

O presente capítulo apresenta as conclusões desta dissertação e indica algumas sugestões para serem seguidas nos próximos trabalhos, dentro desta nova linha de pesquisa proposta para a tecnologia supercrítica.

5.1 Conclusões

Todos os objetivos propostos no início deste trabalho puderam ser cumpridos na sua integridade. Em relação aos objetivos específicos, ficou constado, no Capítulo 2, que o processo de extração supercrítica é altamente atrativo, quando comparado com os processos de extração. Isto porque é uma operação unitária simples, altamente seletiva, rápida, que permite operar com substâncias termolábeis, além de atender melhor as necessidades ambientais e de segurança do processo. Entretanto, um dos entraves que dificulta sua implementação reside na necessidade de operar a elevadas pressões o que necessita de estudos específicos para a minimização dos riscos.

No Capítulo 3, evidenciou-se que a Análise de Riscos é preconizada por lei, sendo assim é obrigação de qualquer empresa, independente do tipo e do porte, realizá-la. Apesar disso, os benefícios trazidos com esta abordagem são inquestionáveis, pois permite identificar antecipadamente fontes potenciais de perigos, suas causas, consequências e probabilidade de ocorrência. Em suma, através da Análise de Riscos é possível propor medidas preventivas que refletem diretamente na diminuição dos gastos com reparos, retrabalhos, indenizações, além de otimizar o processo e melhorar a alocação de recursos. Ou seja, uma Análise de Riscos bem sucedida é convertida em lucro para a empresa.

Também foi abordado no Capítulo 3 que as técnicas de Análise de Riscos são classificadas em qualitativas, semi-quantitativas e quantitativas. Neste sentido, normalmente, aplica-se as técnicas qualitativas para verificar a adequação do projeto/processo às Normas Regulamentadoras. Somente se os dados numéricos forem imprescindíveis para a tomada de decisão é que os estudos se estendem a uma abordagem quantitativa. Neste último caso, o tempo de aplicabilidade da técnica e os custos são maiores, por isso uma opção muito utilizada é usar uma ferramenta semi-quantitativa cujos resultados são intermediários.

Em relação ao objetivo principal proposto neste trabalho deve-se mencionar que a Norma NR 13 utiliza em seu escopo a expressão camadas de proteção, no entanto uma leitura crítica deste documento, fazendo um paralelo com a técnica Análise das Camadas de Proteção, é possível identificar alguns itens que podem ser enquadrados como camadas de proteção. Neste sentido, cinco camadas de proteção são mencionadas pela NR 13 que são: escolha do melhor *design* e *layout* do equipamento; controle básico de processos; alarmes críticos; dispositivos de alívio de pressão e; planos de emergência da planta.

Destas camadas de proteção maior ênfase é dada à primeira (*design* e *layout*), principalmente porque a Norma NR 13 referencia o código ASME que aborda de forma detalhada os aspectos mecânicos que devem ser levados em consideração no projeto e construção de vasos de pressão. Em relação ao *design* do equipamento, outro documento que poderia ser utilizado de forma a complementar esta camada de proteção é a Norma NR 26 que fornece as diretrizes para auxiliar na escolha das cores a serem utilizadas nos equipamentos de processo. Sob o *layout* do equipamento outra referência que poderia auxiliar a Norma NR 13 é a Norma NR 12 que especifica as distâncias mínimas entre as máquinas e os equipamentos.

Em relação à terceira camada de proteção é importante ressaltar que, embora a Norma NR 13 indique a necessidade da presença de alarmes visuais, é preciso uma forte complementação quando o processo em questão é uma extração supercrítica, pois existe a possibilidade de explosão do equipamento por causa da sobrepressão, por exemplo. Assim, alarmes sonoros indicando desvios operacionais seriam de grande valia. Para auxiliar neste quesito pode-se consultar a segunda edição da publicação número 191 de 2007 da EEMUA (*Engineering Equipment and Materials User's Association*) denominada *Alarm Systems - A Guide to Design, Management and Procurement* (Sistema de Alarmes - Um Guia de Projeto, Gerenciamento e Compra) que indica as melhores práticas a serem tomadas como referência e como devem ser julgados projetos de alarmes para plantas industriais. Outra Norma mundialmente reconhecida é a ISA S18.02 denominada *Management of Alarm Systems for the Process Industries* (Sistemas de Gerenciamento de Alarmes para Processos Industriais) que, diferentemente da Norma da EEMUA, aponta o que deve ser alcançado em relação aos sistemas de alarmes em plantas industriais.

A quarta camada de proteção não é abordada pela Norma NR 13 e, no Brasil, não existem Normas para a aplicação do Sistema Instrumentado de Segurança (SIS). Esta camada é importante, sendo que atua no sentido de levar o processo novamente a uma situação de

segurança, quando desvios são estabelecidos. Uma Norma internacional que auxilia na implementação deste tipo de proteção é a Norma internacional IEC 61508.

A quinta camada de proteção é o último recurso instalado no vaso extrator que impediria a explosão do equipamento em caso de uma eventual sobrepressão. Esta camada é plenamente abordada pela Norma NR 13, no entanto pode-se utilizar o código API-520 (*American Petroleum Institute*) de forma complementar, uma vez que este auxilia no projeto e na escolha das válvulas de segurança.

Partindo-se da hipótese de que existe a possibilidade das camadas de proteção anteriormente mencionadas falharem, então é fundamental a presença da sexta camada de proteção que consiste das barreiras de contenção. Não há nenhum item da Norma NR 13 que possa ser enquadrado nesta camada. Também não foi encontrado nenhuma referência que mencionasse as diretrizes para a implementação deste tipo de proteção.

A sétima camada de proteção é plenamente abordada pela Norma NR 13 que, embora não detalhe quais ações internas devem ser efetuadas em situações de emergência, informa que é dever da empresa dispor de manual com procedimentos para situações de emergência. Um documento que poderia ser utilizado de forma paralela para auxiliar esta camada é a Norma NR 23 que fornece informações a respeito de como a planta industrial deve se comportar na presença de focos de incêndios.

A última camada de proteção, representada pelos planos que envolvem remoção, atendimento e resgate após o acidente, não é abordada pela Norma NR 13. Esta camada, todavia, pode representar a última chance de vida dos trabalhadores, frente a um determinado cenário de risco.

Diante das oito camadas de proteção abordadas pela técnica LOPA, cinco estão preconizadas na Norma NR 13 o que sugere dizer que este documento fornece um bom nível de segurança aos processos de extração supercrítica. É preciso fazer algumas complementações para que todas as camadas de proteção sejam abordadas e o processo aumente consideravelmente o nível de segurança. Por fim, ressalta-se que a segurança de um equipamento/processo não se faz apenas com a aplicação de Normas Regulamentadoras, é preciso uma Análise de Riscos mais criteriosa, buscando entender de forma clara, objetiva e honesta as causas, consequências e probabilidade de ocorrência das fontes de perigos previamente identificadas.

5.2 Sugestões para os Trabalhos Futuros

Visando o complemento deste trabalho e buscando melhorar ainda mais o nível de segurança em instalações de processos de extração supercrítica, recomenda-se para os próximos estudos nesta área:

1. Pesquisar com maior profundidade na literatura de riscos, acidentes envolvendo instalações que utilizam a tecnologia supercrítica. Pode-se também utilizar Banco de Dados de empresas que utilizam equipamentos semelhantes aos presentes numa instalação supercrítica, para avaliar possibilidades de falhas neste processo;
2. Utilizar programas computacionais (*softwares*) para simular possíveis ocorrências de acidentes neste tipo de instalação, com o objetivo de detalhar melhor suas causas e propor recomendações para evitar tais eventos;
3. Aplicar, em sua plenitude, as técnicas de Análise de Riscos abordadas neste trabalho para comparar os resultados obtidos. Seria igualmente interessante pesquisar na literatura outras técnicas de Análise de Riscos que poderiam ser utilizadas;
4. Aprofundar o estudo das camadas de proteção deste trabalho, analisando, dentre as camadas de proteção citadas, quais os melhores tipos de equipamentos a serem utilizados numa instalação supercrítica, levando em consideração aspectos relacionados com a resistência dos materiais, corrosão, sobrepressão, superaquecimento, custo e facilidade em se obter o material;
5. Identificar aspectos que poderiam ser utilizados para determinar qual a melhor localização (*layout*) que um determinado equipamento, e o operador, deveriam ter numa instalação supercrítica. Neste caso, a sobrepressão é fator de suma importância, pois pode provocar a explosão do vaso de pressão, lançando fragmentos por todas as direções e em altas velocidades;
6. Abordar estudos de Análise de Confiabilidade Humana em instalações supercríticas, relacionando a necessidade de interferência manual no equipamento, por exemplo, no vaso extrator quando a pressão atinge valores muito altos e o controle automático não funciona, ficando o operador com medo de realizar este processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. The boiling liquid expanding vapour explosion (BLEVE): Mechanism, consequence assessment, management. *Journal of Hazardous Materials*, 141 (3), pp. 489-519, 2007.

ACIDENTE DE BHOPAL. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

ACIDENTE DE FLIXBOROUGH. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

ACIDENTE DE SEVESO. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

ACIDENTE EM VILA SOCÓ. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

ACIDENTE NA CIDADE DO MÉXICO. Disponível em: < <http://www.cetesb.sp.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

AGUIAR, L. A. *Metodologias de análise de riscos APP & HAZOP*. Rio de Janeiro. Disponível em: < <http://www.saneamento.poli.ufrj.br> > Acessado em: 03 de setembro de 2010.

ALMEIDA, A. C. C. *Introdução às boas práticas de engenharia aplicadas à gestão dos sistemas instrumentados de segurança: uma abordagem de SIL*. São Paulo. Disponível em < <http://www.abiquim.org.br> > Acessado em 01 de setembro de 2010.

ALVES, L. C. *Uma aplicação da técnica de análise de camadas de proteção (LOPA) na avaliação de riscos de incêndios nas rotas de cabos de desligamentos de um reator nuclear*.

2007. 73 p. Mestrado em Engenharia Nuclear - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

AMBROS, P. C. *Avaliação da metodologia ATHENA para sua utilização na análise da confiabilidade humana em usinas nucleares*. 2005. 204 p. Mestrado em Engenharia Nuclear - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

API-520. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Sizing, Selection, and Installation of Pressure-Relieving Devices in Refineries*. United States: Information Handling Services, 2002. 100 p.

APLICAÇÕES DA TECNOLOGIA SUPERCRÍTICA. Disponível em: < <http://www.agronex.ufba.br/fluido.html> > Acessado em: julho de 2010.

ASME. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *Boiler and pressure vessel Committee*. United States, McGraw-Hill Companies, 2005. 319 p.

BAJPAI, S.; GUPTA, J. P. Site security for chemical process industries. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 18 (4-6), pp. 301-309, 2005.

BASTOS, A. L. A. *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) como ferramenta de prevenção da qualidade em produtos e processos - uma avaliação da aplicação em um processo produtivo de usinagem de engrenagem*. XXVI ENEGEP, Fortaleza, out. 2006. Disponível em: < <http://www.abepro.org.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

BAUM, D.; FAULK, N.; JOHN PÉREZ, P. E. Improved integration of LOPA with HAZOP analyses. *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), pp. 19-32, 2009.

BAYBUTT, P. Layers of protection analysis for human factors (LOPA-HF). *Process Safety Progress*, 21 (2), pp. 119-129, 2002.

BENEDETTI, J. L. *Como intensificar a confiabilidade humana em sistemas aéreos e industriais*. Trabalho de conclusão do curso de Ciência da Computação. 2006. 70 p. FAJ - Faculdade de Jaguariúna, São Paulo, 2006.

BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M.; MASSINI, R. FMECA approach to product traceability in the food industry. *Food Control*, 17 (2), pp. 137-145, 2006.

BRASIL. *Legislação de segurança e medicina no trabalho. Manual Prático*. 6^a ed. São Paulo: Encíclica Rerum Novarum, 2003. 52 p.

BROWN, A. E. P. *Análise de risco*. GSI, Boletim Técnico, Ano III, N^o 01, jan. / fev. 1998. Disponível em: < <http://www.lmc.ep.usp.br> > Acessado em 03 setembro de 2010.

BRUNNER, G. Supercritical fluids: technology and application to food processing. *Journal of Food Engineering*, 67, pp. 21-33, 2005.

CAMPOS, C. M.; MILAN, M.; SIQUEIRA, L. F. F. *Identificação e avaliação de variáveis críticas no processo de produção da cana-de-açúcar*. Eng. Agríc., Jaboticabal, v.28, n.3, pp. 554-564, jul./set. 2008. Disponível em: < <http://www.scielo.br> > Acessado em: Acessado em 03 setembro de 2010.

CANGUSSÚ, P. P. Análise de risco de processo - terminologia. TECBAHIA, *Revista Baiana de Tecnologia, Camaçari*, v. 22, n. 58, pp. 1-3, jan. / dez. 2007.

CARLÈS, P. A brief review of the thermophysical properties of supercritical fluids. *Journal of Supercritical Fluids*, 53 (1-3), pp. 2-11, 2010.

CARRILHO, E.; TAVARES, M. C. H.; LANÇAS, F. M. Fluidos supercríticos em química analítica. I. Cromatografia com fluido supercrítico: conceitos termodinâmicos. *Química Nova*. v. 24, n. 4, pp. 509-515, 2001.

CASTELLAR, A. *Gerenciamento de Riscos*. Disponível em: < <http://www.fadepe.com.br> > Acessado em 04 de setembro de 2010.

CHIAVERINI, V. Tecnologia Mecânica. Processos de Fabricação e Tratamento. 2^a ed. *Makro Books*. São Paulo, 1986.

CHIN, K. S.; WANG, Y. M.; KA, K. P. G.; YANG, J. B. Failure mode and effects analysis using a group-based evidential reasoning approach. *Computers and Operations Research* 36 (6), pp. 1768-1779, 2009.

COELHO, G. L. V., PAWLISZYN, J. Desorption of ethyl acetate from modified clays by supercritical carbon dioxide. *Latin American Applied Research*, 34 (4), pp. 285-288, 2004.

COMBUSTÃO DE ÓLEOS VEGETAIS. Disponível em: < <http://www2.dbd.puc-rio.br/pergamum/tesesabertas> > Acessado em junho de 2010.

DESCONTAMINAÇÃO EM SEVESO. Disponível em: < <http://latierranoesredonda.blogspot.com> > Acessado em junho de 2010.

DESTRUIÇÃO DA EMPRESA PEMEX. Disponível em: < <http://zonaderisco.blogspot.com> > Acessado em junho de 2010.

DESTRUIÇÃO DA PLANTA INDUSTRIAL DA NYPRO LTDA. Disponível em: < Fonte: <http://zonaderisco.blogspot.com> > Acessado em: junho de 2010.

DESTRUIÇÃO DA VILA SOCÓ EM CUBATÃO, SÃO PAULO. Disponível em: < <http://zonaderisco.blogspot.com> > Acessado em junho de 2010.

DIAS, A. *Definição, identificação e análise do perigo no projeto do produto*. Disponível em: < <http://www.portaldeconhecimentos.org.br> > Acessado em 04 de setembro de 2010.

DIAZ, M. S.; BRIGNOLE, E. A. Modeling and optimization of supercritical fluid processes. *Journal of Supercritical Fluids*, 47 (3), pp. 611-618, 2009.

DINIZ, A.; ALMEIDA, A. C. C.; FRANÇA, S. R. R. O. *Desenvolvimento de programa de segurança de processo: um caso de sucesso entre a BRASKEM e a DNV*. Disponível em: < <http://www.abiquim.org.br> >. Acessado em 01 de setembro de 2010.

DUNJÓ, J.; FTHENAKIS, V.; VÍLCHEZ, J. A.; ARNALDOS, J. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. *Journal of Hazardous Materials*, 173 (1-3), pp. 19-32, 2010.

DUTRA, A. C.; NUNES, L. P. *Proteção Catódica: técnica de combate à corrosão*. Rio de Janeiro: Interciência, 1999, 246 p.

DZIUBIŃSKI, M.; FRATCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (5), pp. 399-408, 2006.

FEPAM. FUNDAÇÃO ESTADUAL DE PROTEÇÃO AMBIENTAL. *Projeto de manual de análise de riscos n° 01, mar. / 2001*. Disponível em: < <http://www.fepam.rs.gov.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

FLEMING, P. V.; GARCIA, C. B.. Avaliação de riscos industriais e ambientais com a Análise Preliminar de Perigos (APP) e lógica FUZZY. Disponível em: < <http://www.abepro.org.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

GEMELLI, E. *Corrosão de materiais metálicos e sua caracterização*. Rio de Janeiro: LTC, 2001, 200 p.

GENTIL, V. *Corrosão*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 2003, 372 p.

GOMES, A. C. T. *Análise da corrosão e da erosão-corrosão do aço carbono em meio com NaHCO₃ e CO₂*. 2005. 137 p. Mestrado em Engenharia de Materiais e Processos - UFPR, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2005.

GRAICHEN, W.; HUBER, L. Extração supercrítica de produtos naturais - A experiência da UHDE, 1994. In: In: *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 14 (supl): 1-216, dez./ 1994.

HAWTHORNE, S. Analytical-Scale Supercritical Fluid Extraction. *J. Am. Chem. Soc.* (Analytical Chemistry), U.S.A., 62 (11) 636-642, 1990.

HSIAO, S. W. Concurrent design method for developing a new product. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 29 (1), pp. 41-55, 2002.

JAGTMAN, H. M.; HALE, A. R.; HEIJER, T. A support tool for identifying evaluation issues of road safety measures. *Reliability Engineering and System Safety*, 90 (2-3), pp. 206-216, 2005.

KE, W. *CO₂ BLEVE (Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion)*. 2009. 139 p. Master in Technology. Telemark University College, Faculty of Technology, Norway, 2009.

KERMANI, M. B.; MORSHED, A. Carbon dioxide corrosion in oil and gas production - A compendium. *Corrosion*, 59 (8), pp. 659-683, 2003.

LEAL, F.; PINHO, A. F.; ALMEIDA, D. A. *Análise de falhas através da aplicação do FMEA e da teoria GREY*. Revista gestão industrial, v. 02, n. 01, PP. 78-88, 2006. Disponível em: < <http://www.pg.utfpr.edu.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

LUCAS, S.; ALONSO, E.; SANZ, J. A.; COCERO, M. J. Safety study in a supercritical extraction plant. *Chemical Engineering and Technology*, 26 (4), pp. 449-461, 2003.

MAKHVILADZE, G. M.; ROBERTS, J. P.; YAKUSH, S. E. Combustion of two-phase hydrocarbon fuel clouds released into the atmosphere. *Combustion and Flame*, 118 (4), pp. 583-605, 1999.

MARRONE, P. A.; HONG, G. T. Corrosion control methods in supercritical water oxidation and gasification processes. *Journal of Supercritical Fluids*, 51 (2), pp. 83-103, 2009.

MARTINS, M. R.; NATACCI, F. B. Metodologia para análise preliminar de riscos de um navio de transporte de gás natural comprimido. Disponível em: < <http://www.ipen.org.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

MCHUGH, M. A.; KRUKONIS, V. J. *Supercritical fluid extraction: Principles and practices*. Butterworth Publishers. United States: Butterworth Publishers, 1986, 415 p.

MEIRELES, M. A. A.; ROSA, P. T. V. Supercritical technology in Brazil: system investigated (1994-2003). *Journal of Supercritical Fluids*, v. 34, p. 109-117, 2005.

MENDES, M. F.; PESSOA, F. L. P.; QUEIROZ, E. M.; MENDES, R.; PALAVRA, A.; COELHO, J. Modelos do processo de transporte na extração do óleo essencial do urucum utilizando fluido supercrítico. *Simpósio Brasileiro de Urucum*. João Pessoa, 2006.

MESQUITA, R. A.; BARBOSA, C. A. *Novo aço ferramenta de alta resistência a quente*. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v. 3, n. 3, pp. 63-68, jan. / mar. 2007. Disponível em: < <http://www.abmbrasil.com.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

MIGUEL, P. A. C.; SEGISMUNDO, A. *O papel do FMEA no processo de tomada de decisão em desenvolvimento de novos produtos: Estudo em uma empresa automotiva*. Produto & Produção, v. 9, n. 2, pp. 106-119, fev. / 2008. Disponível em: <http://seer.ufrgs.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

MINISTÉRIO DA PREVIDÊNCIA SOCIAL. Disponível em: < <http://www.mpas.gov.br> > Acessado em junho de 2010.

MISHINA, K. D. V.; FELÍCIO, J. S.; SILVA, J. B. A. *Modelo para avaliação qualitativa do risco em oleodutos através da lógica fuzzy segundo a metodologia da IBR*. 17º CBECIMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, nov. / 2006, Foz do Iguaçu,. Disponível em: <http://www.metallum.com.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

MOSTIA, W. B. L. Got a risk reduction strategy? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22 (6), pp. 778-782, 2009.

MURPHY, J. F.; CHASTAIN, W.; BRIDGES, W. Initiating events and independent protection layers. *Process Safety Progress*, 28 (4), pp. 374-378, 2009.

NESIC, S.; LUNDE, L. Carbon Dioxide Corrosion of Carbon Steel in Two-Phase Flow. *Corrosion*, 50 (9), pp. 717-727, 1994.

NETO, A. C.; GAUER, G. J. C.; FURTADO, N. R. *Psiquiatria para estudantes de medicina*. Porto Alegre: EDPUCRS, 2003, 944 p.

NR13. NORMA REGULAMENTADORA 13 DO MINISTÉRIO DO TRABALHO E EMPREGO. *Manual técnico de caldeiras e vasos de pressão*. Disponível em: < <http://www.mte.gov.br> > Acessado em 03 de setembro de 2010.

NORMAS REGULAMENTADORAS. Disponível em: < <http://Normasregulamentadoras.wordpress.com> > Acessado em junho de 2010.

NUNES, M. P. *Análise de risco no processo de avaliação de impactos ambientais*. Disciplina: Impacto Ambiental. Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana. 2002. Disponível em: < <http://www.dse.ufpb.br> > Acessado em 04 setembro de 2010.

PAPARELLA, S. Failure Mode and Effects Analysis: A Useful Tool for Risk Identification and Injury Prevention. *Journal of Emergency Nursing*, 33 (4), pp. 367-371, 2007.

PARETO, L. *Resistência e ciência dos materiais*. São Paulo: Hemuns. 2004. 182 p.

PASQUALI, I.; BETTINI, R.; GIORDANO, F. Solid-state chemistry and engineering with supercritical fluids in pharmaceuticals. *European Journal of Pharmaceutical Sciences*, 27 (4), pp. 299-310, 2006.

PENEDO, P. L. M. *Estudo sobre a potencialidade da extração de produtos naturais utilizando CO₂ supercrítico*. 2007. 139 p. Doutorado em Engenharia Química - UFRRJ, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

PERRY, H. R.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. *Perry's Chemical Engineer' Handbook*. United States, McGraw-Hill Companies, 2008. 2400 p.

PINTO, E. P.; GARCIA, H. L.; NASCIMENTO, J. V. S.; SOUZA, R. E. A. *Identificação dos mecanismos de danos atuantes nos equipamentos da unidade de processamento de gás natural da PETROBRAS*. XXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Rio de Janeiro, out. / 2008. Disponível em: < <http://www.abepro.org.br> > Acessado em 04 setembro de 2010.

PLANAS-CUCHI, E.; SALLA, J. M.; CASAL, J. Calculating overpressure from BLEVE explosions. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 17 (6), pp. 431-436, 2004.

PLANTA INDUSTRIAL DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA SITUADA EM TAIWAN. Disponível em: < <http://www.natex.at/indusextractionplants.html> > Acessado em: julho de 2010.

PLANTA INDUSTRIAL DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA SITUADA NA CORÉIA DO SUL. Disponível em: < <http://www.natex.at/indusextractionplants.html> > Acessado em: julho de 2010.

PLANTA INDUSTRIAL DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA SITUADA NA ESPANHA. Disponível em: < <http://www.natex.at/indusextractionplants.html> > Acessado em: julho de 2010.

PLANTA INDUSTRIAL DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA SITUADA NA ÍNDIA. Disponível em: < <http://www.natex.at/indusextractionplants.html> > Acessado em: junho de 2010.

PLANTA INDUSTRIAL DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA SITUADA NA NOVA ZELÂNDIA. Disponível em: < <http://www.natex.at/indusextractionplants.html> > Acessado em: julho de 2010.

PLANTAS INDUSTRIAIS DE EXTRAÇÃO SUPERCRÍTICA. Disponível em: <
<http://www.agronex.ufba.br/fluido.html> > Acessado em: julho de 2010.

PREENCHIMENTO DA PLANILHA FMEA Disponível em: <
<http://www.systems2win.com/solutions/FMEA.htm> > Acessado em junho de 2010.

REID, R. D. FMEA: something old, something new. *Quality Progress*, 38 (5), pp. 90-93, 2005.

REILING, J. G.; KNUTZEN, B. L.; STOECKLEIN, M. FMEA: the cure for medical errors. *Quality Progress*, 36 (8), pp. 67-71, 2003.

ROSA, L. C.; GARRAFA, M. Análise dos modos de falha e efeitos na otimização dos fatores de produção no cultivo agrícola: Subprocesso colheita da canola. *Gestão & Produção*. São Carlos, São Paulo. v. 16, n. 1, pp. 63-73, jan. / mar., 2009.

SALZANO, E.; COZZANI, V. A fuzzy set analysis to estimate loss intensity following blast wave interaction with process equipment. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (4), pp. 343-352, 2006.

SCHNEIDER, G. M. Physicochemical aspects of fluid extraction. *Fluid Phase Equilibria*, 10 (2-3), pp. 141-157, 1983.

SILBERMAN, T. D. A. M.; MATTOS, U. A. O. *Metodologia para análise de risco: estudo em uma unidade de co-geração de energia de um shopping Center de Macaé*. Organização & Estratégia, v. 4, n. 1, pp. 155, Niterói, jan. / abr. 2008. Disponível em: <
<http://www.latec.uff.br> > Acessado em 04 de setembro de 2010.

SILVA, W. C. L. *BLAST – Onda de choque gerada em detonações*. Disponível em: <
http://www.sige.ita.br/VIII_SIGE/AAe/AA002.pdf > Acessado em: 01 de setembro de 2010.

SKLET, S. Hydrocarbon releases on oil and gas production platforms: Release scenarios and safety barriers. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19 (5), pp. 481-493, 2006.

SONNEMANS, P. J. M.; KÖRVERS, P. M. W. Accidents in the chemical industry: Are they foreseeable? *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 19 (1), pp. 1-12, 2005.

SPATH, P. L. Using failure mode and effects analysis to improve patient safety. *AORN journal*, 78 (1), pp. 16-37; quiz 41, 2003.

SUPERINTENDÊNCIA REGIONAL DO TRABALHO E EMPREGO EM MINAS GERAIS. Disponível em: < <http://www.mte.gov.br> > Acessado em: maio de 2010.

TELLES, P. C. S. *Materiais para equipamentos de processo. Interciência*, 1979. 230 p. Tipos de desvios associados com as palavras-guia. Disponível em: < <http://www.eps.ufsc.br> > Acessado em junho de 2010.

TIXIER, J.; DUSSERRE, G.; SALVI, O.; GASTON, D. Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 15 (4), pp. 291-303, 2002.

TRUCCO, P.; CAVALLIN, M. A quantitative approach to clinical risk assessment: the CREA method. *Safety Science*, 44 (6), pp. 491-513, 2006.

VASCONCELOS, F. M. *Uma aplicação da técnica de análise de camadas de proteção (LOPA) na avaliação de riscos do sistema de hidrogênio de refrigeração de gerador elétrico principal de uma usina nuclear*. 2008. 72 p. Mestrado em Engenharia Nuclear - COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

VELASCO, R. J.; VILLADA, H. S.; CARRERA, J. E. Applications of supercritical fluids in the agroindustry. *Informacion Tecnológica*, 18 (1), pp. 53-66, 2007.

WELBORN, C. Using FMEA to assess outsourcing risk. *Quality Progress*, 40 (8), pp. 17-21 2007.

WILLIAMS, D. F. Extraction with supercritical gases. *Chemical Engineering Science*, 36 (11), pp. 1769-1788, 1981.

WOLYNEC, S. *Técnicas eletroquímicas em corrosão*. Editora da Universidade de São Paulo, 2003. 176 p.

ZHAN, Y.; XU, F.; ZHANG, Y. The application of HAZOP analysis on risk assessment of the 10000TEU container ships. *International Asia Symposium on Intelligent Interaction and Affective Computing, ASIA 2009*, art. n°. 5376090, pp. 59-62, 2009.

ZIMMERMANN, A. T. *Análise de riscos de um vazamento de gás natural em um gasoduto*. 2009. 120 p. Mestrado em Engenharia Química - UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina 2009.

ANEXO I

NR-13 MANUAL TÉCNICO DE CALDEIRAS E VASOS DE PRESSÃO

13.6. Vasos de Pressão – Disposições Gerais

13.6.1. Vasos de pressão são equipamentos que contêm fluidos sob pressão interna ou externa.

Vasos de pressão estão sempre submetidos simultaneamente à pressão interna e à pressão externa. Mesmo vasos que operam com vácuo estão submetidos a essas pressões, pois não existe vácuo absoluto. O que usualmente denomina-se vácuo é qualquer pressão inferior à atmosférica. O vaso é dimensionado, considerando-se a pressão diferencial resultante que atua sobre as paredes, que poderá ser maior interna ou externamente.

Há casos em que o vaso de pressão deve ser dimensionado pela condição de pressão mais severa, a exemplo de quando não exista atuação simultânea das pressões interna e externa.

Vasos de pressão podem ser construídos de materiais e formatos geométricos variados em função do tipo de utilização a que se destinam. Dessa forma existem vasos de pressão esféricos, cilíndricos, cônicos, etc., construídos em aço carbono, alumínio, aço inoxidável, fibra de vidro e outros materiais.

Os vasos de pressão podem conter líquidos, gases ou misturas destes. Algumas aplicações são: armazenamento final ou intermediário, amortecimento de pulsação, troca de calor, contenção de reações, filtração, destilação, separação de fluidos, criogenia, etc.

A NR-13 aplica-se a vasos de pressão instalados em unidades industriais, e outros estabelecimentos públicos ou privados, tais como: hotéis, hospitais, restaurantes, etc.

Sendo regulamentadora da Lei nº 6.514, 23 de dezembro de 1977, da CLT, esta Norma também é aplicável a equipamentos instalados em navios, plataformas de exploração e produção de petróleo, desde que não exista legislação em contrário.

13.6.1.1. O campo de aplicação desta NR, no que se refere a vasos de pressão, está definido no Anexo II.

Ver comentários no Anexo II.

13.6.1.2. Os vasos de pressão abrangidos por esta NR estão classificados em categorias de acordo com o Anexo II.

Ver comentários no Anexo II.

13.6.2. Constitui risco grave e iminente a falta de qualquer um dos seguintes itens:

- a) Válvula ou outro dispositivo de segurança com pressão de abertura ajustada em valor igual ou inferior a PMTA, instalada diretamente no vaso ou no sistema que o inclui.
- b) Dispositivo de segurança contra bloqueio inadvertido da válvula quando esta não estiver instalada diretamente no vaso.
- c) Instrumento que indique a pressão de operação.

Entende-se por “outro dispositivo” de segurança dispositivos que têm por objetivo impedir que a pressão interna do vaso atinja valores que comprometam sua integridade estrutural. São exemplos de “outros dispositivos”: discos de ruptura, válvulas quebra-vácuo, plugues fusíveis, etc.

Válvulas de segurança-piloto operadas podem ser consideradas como “outro dispositivo”, desde que mantenha a capacidade de funcionamento em qualquer condição de anormalidade operacional.

As válvulas de segurança devem abrir em pressão estabelecida pelo código de projeto. No caso do Código ASME VIII, este valor é igual ou inferior à PMTA. Após a abertura, a pressão da caldeira poderá elevar-se pouco acima da PMTA, até a atuação plena da válvula. Essa sobrepressão é definida pelo código de projeto, e não deve ser ultrapassada.

O dispositivo de segurança é um componente que visa aliviar automaticamente e sem o concurso do operador à pressão do vaso, independentemente das causas que provocaram a sobrepressão. Dessa forma, pressostatos, reguladores de pressão, malhas de controle de instrumentação, etc., não devem ser considerados como dispositivos de segurança.

O “dispositivo de segurança contra bloqueio inadvertido” é aplicável à:

1. Vasos de pressão com dois ou mais dispositivos de segurança.
2. Conjunto de vasos interligados e protegidos por única válvula de segurança.

Vasos com duas ou mais válvulas de segurança, com bloqueios independentes, são utilizados quando se deseja facilidade de manutenção: pode-se remover uma das válvulas de

segurança para reparo ou inspeção, mantendo-se as demais em operação. Nesse caso, as válvulas de segurança remanescentes em conjunto, ou isoladamente, deverão ser projetadas com suficiente capacidade para aliviar a pressão do vaso. Não deve ser esquecido que “bloqueios inadvertidos” podem estar instalados a montante ou a jusante das válvulas de segurança.

O “dispositivo que evite o bloqueio inadvertido” do dispositivo de segurança é aplicável a vasos de pressão com dois ou mais dispositivos de segurança. São exemplos desses dispositivos válvulas de duas ou mais vias, válvulas-gaveta sem volante ou com volante travado por cadeado, etc.

Quando o vaso de pressão possuir apenas uma válvula de segurança, não é recomendável a existência de bloqueio entre a válvula de segurança e o vaso de pressão.

Os instrumentos para indicação de pressão, por exemplo, manômetros, poderão ter mostrador analógico ou digital, e a instalação dos mesmos poderá ser feita no próprio vaso ou em sala de controle apropriada.

13.6.3. Todo vaso de pressão deve ter afixado em seu corpo, em local de fácil acesso e bem visível, placa de identificação indelével com, no mínimo, as seguintes informações:

- a) Fabricante.
- b) Número de identificação.
- c) Ano de fabricação.
- d) Pressão máxima de trabalho admissível.
- e) Pressão de teste hidrostático.
- f) Código de projeto e ano de edição.

Número de identificação é a identificação alfanumérica, conhecida como *tag*, item, número de ordem, etc., atribuído pelo projetista ou estabelecimento ao vaso de pressão.

Para efeito do atendimento ao item “f”, caso não seja conhecido o ano de edição do código, o PH deverá verificar se o equipamento sob análise se enquadra nos requisitos da última edição publicada que precedeu o ano de fabricação do vaso.

Não sendo conhecido o código de projeto original ou o ano de fabricação, o vaso deverá ser verificado de acordo com um dos códigos existentes para vasos de pressão, que

seja aceito internacionalmente, tais como: *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), *Deutsches Institut Für Normung* (DIN), *Japanese Industrial Standard* (JIS), etc.

As placas de identificação já instaladas deverão ser adequadas aos requisitos dessa NR.

13.6.3.1. Além da placa de identificação, deverão constar, em local visível, a categoria do vaso, conforme Anexo IV, e seu número ou código de identificação.

As informações referentes à identificação do vaso e sua respectiva categoria deverão ser pintadas em local onde possam ser facilmente identificadas.

Opcionalmente à pintura, as informações poderão ser inseridas numa placa com visualização equivalente.

A pintura deve permitir a rápida identificação do equipamento na unidade em situação de emergência.

Ocorrendo vazamentos, incêndio e outros eventos que produzam fumaça, vapores ou névoa, a visão dos operadores será prejudicada. Nesses casos, equipes externas que entrem na unidade para auxiliar em emergências também são auxiliadas pela boa pintura de identificação.

13.6.4. Todo vaso de pressão deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalado, a seguinte documentação devidamente atualizada:

- a) Prontuário do Vaso de Pressão, a ser fornecido pelo fabricante, que contenha as seguintes informações:
- código de projeto e ano de edição;
 - especificação dos materiais;
 - procedimentos utilizados na determinação da PMTA;
 - conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento;
 - características funcionais;
 - dados dos dispositivos de segurança;
 - ano de fabricação;
 - categoria do vaso.
- b) Registro de Segurança, em conformidade com o subitem 13.6.5.
- c) Projeto de Instalação, em conformidade com o item 13.7.

- d) Projetos de Alteração ou Reparo, em conformidade com os subitens 13.9.2 e 13.9.3.
- e) Relatórios de Inspeção, em conformidade com o subitem 13.10.8.

Se o estabelecimento onde estiverem instalados os vasos de pressão possuir diversas unidades, os documentos deverão estar disponíveis na unidade em que estiverem instalados para que possam ser prontamente consultados.

Se os operadores e responsáveis pelos equipamentos não permanecerem no local de instalação do vaso de pressão, os documentos devem ficar próximos ao operador responsável.

Esta exigência também se aplica aos navios e às plataformas de exploração e produção de petróleo.

Não é necessário que toda a documentação esteja arquivada num único local da unidade. É recomendável, porém, que todos os documentos do prontuário estejam agrupados.

O procedimento para determinação da PMTA deverá explicar o roteiro para seu estabelecimento, passo a passo, incluindo tabelas, ábacos, etc. que por ventura sejam consultados.

Caso haja interesse por parte do estabelecimento, poderá ser adotada como PMTA a pressão de projeto do vaso.

Entende-se por vida útil do vaso o período de tempo entre a data de fabricação e a data na qual o vaso tenha sido considerado inadequado para uso.

A documentação deve ser mantida durante toda a vida útil do vaso de pressão.

13.6.4.1. Quando inexistente ou extraviado, o Prontuário do Vaso de Pressão deve ser reconstituído pelo proprietário, com responsabilidade técnica do fabricante ou de PH, sendo imprescindível a reconstituição das características funcionais, dos dados dos dispositivos de segurança e dos procedimentos para determinação da PMTA.

A maior parte da documentação exigida, particularmente aquela englobada no prontuário do vaso, deve ser fornecida de maneira detalhada pelo fabricante do vaso de pressão.

Se o estabelecimento não possuir essa documentação, parte da mesma deverá ser reconstituída conforme determinado neste subitem.

A reconstituição dos documentos é sempre de responsabilidade do proprietário do vaso de pressão. Para tanto, ele poderá se utilizar dos serviços do fabricante do vaso. Caso este seja indeterminado ou já não exista PH, precisará de um PH ou empresa especializada.

Normas técnicas internacionalmente reconhecidas indicam que o cálculo da PMTA deve considerar, além da pressão, outros esforços solicitantes, devendo englobar todas as partes do equipamento, tais como: conexões, flanges, pescoços de conexões, suportes, selas, etc.

13.6.4.2. O proprietário de vaso de pressão deverá apresentar, quando exigido pela autoridade competente do Órgão Regional do Ministério do Trabalho e Emprego, a documentação mencionada no subitem 13.6.4.

A autoridade competente do Órgão Regional do Ministério do Trabalho (Delegacia Regional do Trabalho – DRT) é o Delegado Regional do Trabalho na sua jurisdição.

13.6.5. O Registro de Segurança deve ser constituído por livro de páginas numeradas, pastas ou sistema informatizado ou não, com confiabilidade equivalente, onde serão registradas:

- a) Todas as ocorrências importantes capazes de influir nas condições de segurança.
- b) As ocorrências de inspeção de segurança.

O Registro de Segurança pode ser constituído por um livro de páginas numeradas para cada vaso de pressão ou de um livro de páginas numeradas para diversos vasos de pressão.

É possível que a empresa utilize outro sistema (por exemplo: informatizado) desde que, de fato, apresente a mesma segurança contra burla e permita “assinatura eletrônica.”

É importante que sejam registradas neste livro somente as ocorrências que possam afetar a integridade física do ser humano. São exemplos típicos dessas ocorrências: explosões, incêndios, vazamentos, ruptura de componentes, operação fora dos valores previstos, funcionamento irregular das válvulas de segurança, serviços de manutenção efetuados, etc.

É prática nas unidades industriais, o preenchimento do Livro de Turno ou Livro de Passagem de Serviço ou similar que poderão ser aceitos como Registro de Segurança, desde que atenda o disposto no item 13.6.5.

O Registro de Segurança pode ser preenchido por qualquer profissional que disponha de informação relevante sobre a segurança do equipamento.

13.6.6. A documentação referida no subitem 13.6.4 deve estar sempre à disposição para consulta dos operadores, do pessoal de manutenção, de inspeção e das representações dos trabalhadores e do empregador na Comissão Interna de Prevenção de Acidentes (CIPA), devendo o proprietário assegurar pleno acesso a essa documentação, inclusive à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento, quando formalmente solicitado.

A documentação referida neste item deverá estar sempre disponível para consulta e fiscalização dentro do estabelecimento.

Quando for necessário retirar a documentação do estabelecimento, deverá ser providenciada a sua duplicação.

13.7. Instalação de Vasos de Pressão

13.7.1. Todo vaso de pressão deve ser instalado de modo que todos os drenos, respiros, bocas de visita e indicadores de nível, pressão e temperatura, quando existentes, sejam facilmente acessíveis.

Os acessórios descritos nesse subitem, que possam exigir a presença do trabalhador para operação, manutenção ou inspeção, devem permitir acesso fácil e seguro por meio de escadas, plataformas e outros em conformidade com as NRs.

13.7.2. Quando os vasos de pressão forem instalados em ambientes confinados, a instalação deve satisfazer os seguintes requisitos:

- a) Dispor de pelo menos duas saídas amplas, permanentemente desobstruídas e dispostas em direções distintas.
- b) Dispor de fácil acesso e seguro para as atividades de manutenção, operação e inspeção, sendo que, para guarda-corpos vazados, os vãos devem ter dimensões que impeçam a queda de pessoas.
- c) Dispor de ventilação permanente com entradas de ar que não possam ser bloqueadas.
- d) Dispor de iluminação conforme Normas oficiais vigentes.
- e) Possuir sistema de iluminação de emergência.

Os itens deste subitem referem-se ao local onde está instalado o vaso de pressão. Dessa maneira, o item “a” prescreve que a área de processo ou ambiente onde esteja instalado o vaso de pressão deva possuir duas saídas em direções distintas. Objetiva-se, dessa forma, evitar que, ocorrendo um vazamento, incêndio ou qualquer outra possibilidade de risco aos operadores, estes não fiquem cercados pelo fogo ou vazamento, dispondo sempre de uma rota de fuga alternativa.

Deverá ser entendido como sistema de iluminação de emergência, todo sistema que, em caso de falha no fornecimento de energia elétrica, consiga manter adequadamente iluminado os pontos estratégicos à operação do vaso de pressão. São exemplos desses sistemas: lâmpadas ligadas a baterias que se autocarregam nos períodos de fornecimento Normal, geradores movidos a vapor ou motores a combustão, etc.

13.7.3. Quando o vaso de pressão for instalado em ambiente aberto, a instalação deve satisfazer às alíneas “a”, “b”, “d” e “e” do subitem 13.7.2.

13.7.4. Constitui risco grave e iminente o não-atendimento às seguintes alíneas do subitem 13.7.2:

- a) “a”, “c” e “e” para vasos instalados em ambientes confinados;
- b) “a” para vasos instalados em ambientes abertos;
- c) “e” para vasos instalados em ambientes abertos e que operem à noite.

13.7.5. Quando o estabelecimento não puder atender o disposto no subitem 13.7.2, deve ser elaborado Projeto Alternativo de Instalação com medidas complementares de segurança que permitam a atenuação dos riscos.

Caso o estabelecimento não possa atender às exigências estabelecidas no subitem 13.7.2 ou obedecer a aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas NRs, nas convenções ou mais disposições legais, deverá elaborar Projeto Alternativo de Instalação que contenha medidas concretas para atenuação dos riscos.

Esse requisito se aplica tanto às instalações já existentes como para as novas instalações.

13.7.5.1. O Projeto Alternativo de Instalação deve ser apresentado pelo proprietário do vaso de pressão para obtenção de acordo com a representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento.

13.7.5.2. Quando não houver acordo, conforme previsto no subitem 13.7.5.1, a intermediação do órgão regional MTE poderá ser solicitada por qualquer uma das partes e, persistindo o impasse, a decisão caberá a esse órgão.

13.7.6. A autoria do Projeto de Instalação de vasos de pressão enquadrados nas categorias “I”, “II” e “III”, conforme Anexo IV, no que concerne ao atendimento desta NR, é de responsabilidade de PH, conforme citado no subitem 13.1.2, e deve obedecer aos aspectos de segurança, saúde e meio ambiente previstos nas NRs, convenções e disposições legais aplicáveis.

A autoria do Projeto de Instalação de vasos de Pressão é de responsabilidade de PH.

Sempre que, na elaboração do projeto, o PH solicitar a participação de profissionais especializados e legalmente habilitados, estes serão tidos como responsáveis pela parte que lhes diga respeito, devendo ser explicitamente mencionados como autores das partes que tiverem executado.

13.7.7. O Projeto de Instalação deve conter pelo menos a planta baixa do estabelecimento, com o posicionamento e a categoria de cada vaso e das instalações de segurança.

O Projeto de Instalação deverá conter pelo menos a planta baixa do estabelecimento, com o posicionamento e a categoria de cada vaso de pressão existente na instalação. A planta deverá também posicionar instalações de segurança tais como: extintores, sistemas de sprinklers, canhões de água, câmaras de espuma, hidrantes, etc.

Todos os documentos que compõem o Projeto de Instalação deverão ser devidamente assinados pelos profissionais legalmente habilitados.

Quando uma instalação já existente não possuir os desenhos ou documentos citados, ou quando a identificação dos profissionais legalmente habilitados não estiver clara, o Projeto de Instalação deverá ser reconstituído sob autoria de um PH.

13.8. Segurança na Operação de Vasos de Pressão

13.8.1. Todo vaso de pressão enquadrado nas categorias “I” ou “II” deve possuir Manual de Operação próprio ou instruções de operação contidas no Manual de Operação da unidade onde estiver instalado, em língua portuguesa e de fácil acesso aos operadores, que contenha no mínimo:

- a) Procedimentos de partidas e paradas.
- b) Procedimentos e parâmetros operacionais e rotina.
- c) Procedimentos para situações de emergência.
- d) Procedimentos gerais de segurança, saúde e de preservação do meio ambiente.

O Manual de Operação das unidades que contenham vasos de pressão de categorias “I” ou “II” deverá estar sempre disponível para consulta dos operadores, em local próximo ao seu posto de trabalho. O Manual deverá ser mantido atualizado, sendo que todas as alterações ocorridas nos procedimentos operacionais ou nas características dos equipamentos, deverão ser de pleno conhecimento dos operadores e serem prontamente incorporadas nos respectivos manuais.

Este requisito também é aplicável a navios e a plataformas de exploração e produção de petróleo.

13.8.2. Os instrumentos e controles de vasos de pressão devem ser mantidos calibrados e em boas condições operacionais.

Todos os instrumentos e controles que interfiram com a segurança do vaso de pressão deverão ser periodicamente calibrados e serem adequadamente mantidos.

A utilização de artifícios como, por exemplo, *jumps* que neutralizem instrumentos ou sistemas de controle e segurança será considerada como risco grave e iminente e pode acarretar a interdição do equipamento.

A periodicidade de manutenção e a definição de quais instrumentos e controles dos vasos de pressão deverão ser englobados neste subitem são de responsabilidade de profissionais legalmente habilitados para cada especialidade.

13.8.2.1. Constitui condição de risco grave e iminente o emprego de artifícios que neutralizem seus sistemas de controle e segurança.

A utilização de *jumps* transitórios em situações onde exista redundância ou onde esteja sendo feita substituição ou reparos de componentes não será considerada como “artifício que neutralize” sistemas de controle ou instrumentos.

Para esses casos, é necessário fazer estudo dos riscos envolvidos e acompanhamento dessa operação, envolvendo todos os setores que possam por esta ser afetados.

13.8.3. A operação de unidades que possuam vasos de pressão de categorias “I” ou “II” deve ser efetuada por profissional com Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo, sendo que o não-atendimento a essa exigência caracteriza condição de risco grave e iminente.

O responsável pela existência de operadores de unidades de processo treinados adequadamente é o dono do estabelecimento ou seu representante legal.

Deve ser entendido que em função da complexidade da unidade, um operador poderá operar simultaneamente diversos vasos de pressão ou um único vaso de pressão poderá estar sob controle de diversos operadores. É importante que os operadores responsáveis pela operação da unidade estejam em condições de atuar prontamente para corrigir situações anormais que se apresentem.

Por ocasião da implantação de Sistemas Digitalizados de Controle a Distância (SDCD) considerar a existência de um efetivo capaz de atuar em situações de emergência.

13.8.4. Para efeito desta NR, será considerado profissional com Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo aquele que satisfizer uma das seguintes condições:

a) Possuir Certificados de Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo expedido por instituição competente para o treinamento.

b) Possuir experiência comprovada na operação de vasos de pressão das categorias “I” ou “II” de pelo menos dois anos antes da vigência desta NR.

Para casos onde for necessária a comprovação de experiência na operação de unidades de processo, deve-se considerar:

1. Anotações na Carteira de Trabalho, ou

2. Prontuário ou atribuições fornecidos pelo estabelecimento, ou
3. Testemunho de pessoas.

Para cálculo dos dois anos de experiência, deverão ser descontados os tempos de interrupção.

13.8.5. O pré-requisito mínimo para participação, como aluno, no Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo é o atestado de conclusão do 1º grau.

13.8.6. O Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo deve obrigatoriamente:

- a) Ser supervisionado tecnicamente por PH citado no subitem 13.1.2.
- b) Ser ministrada por profissionais capacitados para esse fim.

Deverão ser incluídas no treinamento outras matérias teóricas ou práticas que forem julgadas relevantes pelo supervisor técnico do treinamento.

13.8.7. Os responsáveis pela promoção do Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo estarão sujeitos ao impedimento de ministrar novos cursos, bem como as outras sanções legais cabíveis no caso de inobservância do disposto subitem 13.8.6.

13.8.8. Todo profissional com Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo deve cumprir estágio prático, supervisionado, na operação de vasos de pressão com as seguintes durações mínimas:

- a) Trezentas horas para vasos de categorias “I” ou “II”.
- b) Cem horas para vasos de categorias “III”, “IV” ou “V”.

A empresa ou estabelecimento deverá arquivar os documentos que comprovem a participação de seus operadores no referido estágio.

No caso de unidades que não possuam vasos de pressão de categorias “I” ou “II”, não há necessidade de existirem profissionais com Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo. Faz-se necessário, no entanto, o cumprimento de estágio prático supervisionado de 100 horas.

O supervisor de estágio poderá ser, por exemplo:

1. O chefe da operação.
2. Um operador chefe.
3. Um engenheiro responsável pelo processo.
4. Profissional habilitado.
5. Operador mais experiente.

13.8.9. O estabelecimento onde for realizado o Estágio Prático Supervisionado deve informar previamente à representação sindical da categoria profissional predominante no estabelecimento:

- a) Período de realização do estágio.
- b) Entidade, empresa ou profissional responsável pelo Treinamento de Segurança na Operação de Unidades de Processo.
- c) Relação dos participantes do estágio.

13.8.10. Atualização dos operadores deve ser permanente por meio de constantes informações das condições físicas e operacionais dos equipamentos, atualização técnica, informações de segurança, participação em cursos, palestras e eventos pertinentes.

A necessidade e ocasião da reciclagem são de responsabilidade do empregador.

Para efeito de comprovação, deverá ser anexado à pasta funcional de cada operador o tipo de atividade, data de realização, duração, etc.

13.8.11. Constitui condição de risco grave e iminente a operação de qualquer vaso de pressão em condições diferentes das previstas no projeto original, sem que:

- a) Seja reprojetoado, levando em consideração todas as variáveis envolvidas na nova condição de operação.

b) Sejam adotados todos os procedimentos de segurança decorrentes de sua nova classificação no que se refere à instalação, operação, manutenção e inspeção.

A operação de vasos de pressão em condições diferentes das previstas em seu projeto pode ser extremamente perigosa.

São exemplos de condições objeto deste item:

1. Pressões superiores às de operação.
2. Temperaturas superiores às consideradas no projeto.
3. Utilização de fluidos diferentes dos previstos originalmente.
4. Alterações de geometria, espessura, tipo de material, etc.

Sempre que forem efetuadas modificações no projeto do vaso de pressão ou nas suas condições operacionais, deverão ser adotados todos os procedimentos de segurança necessários.

As modificações efetuadas deverão sempre fazer parte da documentação do vaso de pressão.

13.9. Segurança na Manutenção de Vasos de Pressão

13.9.1. Todos os reparos ou alterações em vasos de pressão devem respeitar ao respectivo código de projeto de construção e às prescrições do fabricante no que se refere a:

- a) Materiais.
- b) Procedimentos de execução.
- c) Procedimentos de controle de qualidade.
- d) Qualificação e certificação de pessoal.

No caso de tubulação, a abrangência deste subitem limita-se ao trecho existente entre o corpo do vaso e a solda ou flange mais próximo, inclusive.

Deve ser considerada como “reparo” qualquer intervenção que vise corrigir não-conformidades com relação ao projeto original. Por exemplo, reparos com solda para recompor áreas danificadas, remoção de defeitos em juntas soldadas ou no metal-base, substituição de internos ou conexões corroídas, etc.

Deve ser considerada como “alteração” qualquer intervenção que resulte em alterações no projeto original, inclusive nos parâmetros operacionais do vaso. Por exemplo, alterações nas especificações dos materiais, mudanças de internos ou conexões, mudanças de geometria, etc.

São exemplos de qualificação e certificação de pessoal os procedimentos previstos pelo código ASME Seção IX (Qualificação de Soldagem e Brasagem) e Seção V (Ensaio Não-Destrutivos).

13.9.1.1. Quando não for conhecido o código de projeto de construção, deverá ser respeitada a concepção original do vaso, empregando-se procedimentos de controle do maior rigor, prescritos pelos códigos pertinentes.

Caso a documentação do vaso de pressão tenha se extraviado e não seja possível localizar o fabricante, os reparos e alterações deverão respeitar a concepção adotada originalmente. Nessas ocasiões, quando forem necessários reparos e alterações, o PH deverá propor testes e ensaios, bem como os mais rigorosos critérios de aceitação compatíveis com o código de projeto adotado.

13.9.1.2. A critério do PH, citado no subitem 13.1.2, podem ser utilizadas tecnologias de cálculo ou procedimentos mais avançados, em substituição aos previstos pelos códigos de projeto.

Em casos particulares e desde que embasado pelo PH, poderão ser utilizados procedimentos de cálculo e tecnologias não previstas pelo código de projeto. São exemplos desses procedimentos: técnicas de mecânica da fratura que permitam a convivência com descontinuidades subcríticas, técnicas alternativas de soldagem que dispensem o alívio de tensões, modelagem por elementos finitos, etc.

13.9.2. Projetos de Alteração ou Reparo devem ser concebidos previamente nas seguintes situações:

- a) Sempre que as condições de projeto forem modificadas.
- b) Sempre que forem realizados reparos que possam comprometer a segurança.

Antes da execução de qualquer reparo ou alteração que possam comprometer a segurança do vaso de pressão ou dos trabalhadores, deverá ser elaborado o respectivo Projeto de Alteração ou Reparo que passará a fazer parte da documentação do vaso de pressão.

Não é necessário enviar o Projeto de Alteração ou Reparo para apreciação de órgãos externos à empresa, tais como DRT, sindicato, etc.

São exemplos de Projetos de Alteração ou Reparo: alteração de especificação de materiais do vaso ou acessório, inclusão ou exclusão de conexões, reparos com solda, etc.

13.9.3. O Projeto de Alteração ou Reparo deve:

- a) Ser concebido ou aprovado por PH, citado no subitem 13.1.2.
- b) Determinar materiais, procedimentos de execução, controle de qualidade e qualificação de pessoal.
- c) Ser divulgado para funcionários do estabelecimento que possam estar envolvidos com o equipamento.

O Projeto de Alteração e Reparo pode ser concebido por firma especializada, desde que a mesma esteja registrada no CREA e disponha de responsável técnico legalmente habilitado.

Reparos ou alterações que envolvam as especialidades de eletricidade, eletrônicas ou química deverão ser concebidos e assinados por profissionais legalmente habilitados para cada campo específico. Independentemente dessa necessidade, todo Projeto de Alteração e Reparo deverá ser assinado por PH.

13.9.4. Todas as intervenções que exijam soldagem em partes que operem sob pressão devem ser seguidas de teste hidrostático, com características definidas pelo PH, citado no subitem 13.1.2, levando em conta o disposto no item 13.10.

Quando não definidos em Normas ou códigos, caberá ao PH em função de sua experiência e conhecimento, definir os parâmetros envolvidos no teste hidrostático. Nesses parâmetros deverão constar:

1. Medidas de segurança necessárias para proteção das pessoas envolvidas na realização do teste.
2. Fluido a ser utilizado para pressurização.
3. Taxa de subida da pressão e patamares, quando necessário.

4. Pressão final do teste.
5. Tempo em que o equipamento ficará pressurizado.

As características e resultados do teste hidrostático deverão constar do Relatório de Inspeção de Segurança que compreende o teste, seja ela (inspeção) inicial, periódica ou extraordinária.

13.9.4.1. Pequenas intervenções superficiais podem ter o teste hidrostático dispensado, a critério do PH, citado no subitem 13.1.2.

O PH poderá dispensar o teste hidrostático, sob sua responsabilidade técnica, considerando os aspectos do tipo de reparo efetuado, ensaios não-destrutivos executados, qualificação de pessoal envolvido, risco de falha do serviço executado, etc.

13.9.5. Os sistemas de controle e segurança dos vasos de pressão devem ser submetidos à Manutenção Preventiva ou Preditiva.

A definição dos instrumentos e sistemas de controle a serem incluídos no plano de Manutenção Preditiva/Preventiva, bem como a respectiva periodicidade, deverá ser atribuída a profissionais com competência legal para executar este tipo de atividade.

13.10. Inspeção de Segurança de Vasos de Pressão

13.10.1. Os vasos de pressão devem ser submetidos a Inspeções de Segurança Inicial, periódica e extraordinária.

13.10.2. A Inspeção de Segurança Inicial deve ser feita em vasos novos, antes de sua entrada em funcionamento, no local definitivo de instalação, devendo possuir exame externo, interno e teste hidrostático, considerando as limitações mencionadas no subitem 13.10.3.5.

Não serão aceitos como Inspeção de Segurança Inicial exames internos, externos e teste hidrostático efetuados nas dependências do fabricante do vaso de pressão. Esses exames são importantes e necessários, porém não constituem a Inspeção de Segurança Inicial, uma vez que seus componentes podem sofrer avarias durante o transporte, armazenamento e

montagem no local definitivo. A Inspeção de Segurança Inicial só poderá ser realizada quando o vaso de pressão já estiver instalado em seu local definitivo.

Valem para esse subitem as ressalvas feitas quanto à realização do teste hidrostático constantes dos subitens 13.10.3.4 e 13.10.3.5.

13.10.3. A Inspeção de Segurança Periódica, constituída por exame externo, interno e teste hidrostático, deve obedecer aos seguintes prazos máximos estabelecidos a seguir:

a) Para estabelecimentos que não possuam Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, conforme citado no Anexo III:

| Categoria do Vaso | Exame Externo | Exame Interno | Teste Hidrostático |
|--------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| I | 1 ano | 3 anos | 6 anos |
| II | 2 anos | 4 anos | 8 anos |
| III | 3 anos | 6 anos | 12 anos |
| IV | 4 anos | 8 anos | 16 anos |
| V | 5 anos | 10 anos | 20 anos |

b) Para estabelecimentos que possuam Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, conforme citado no Anexo III:

| Categoria do Vaso | Exame Externo | Exame Interno | Teste Hidrostático |
|--------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| I | 3 ano | 6 anos | 12 anos |
| II | 4 anos | 8 anos | 16 anos |
| III | 5 anos | 10 anos | a critério |
| IV | 6 anos | 12 anos | a critério |
| V | 7 anos | a critério | a critério |

A abrangência da inspeção de segurança periódica bem como as técnicas a serem utilizadas deverão ser definidas pelo PH com base no histórico do vaso de pressão e nas Normas técnicas vigentes.

Os prazos definidos nesse item devem ser considerados como máximos. O prazo real deverá ser estabelecido pelo PH em função da experiência anterior disponível, devendo ser contado a partir do último exame executado no vaso de pressão.

Os prazos estabelecidos no item “b” são aplicáveis a empresas que possuam Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, certificado em conformidade com as prescrições do Anexo III.

Não faz parte do escopo dessa NR detalhar métodos ou procedimentos de inspeção. Essa ação deverá ser feita pelo PH com base em códigos e Normas internacionalmente reconhecidos e conhecimentos de engenharia.

Uma vez que, mesmo fora de operação, alguns vasos poderão sofrer desgaste corrosivo acentuado, deverá ser considerada para contagem do prazo de inspeção a data da última inspeção de segurança completa, e não a data de início ou retomada de operação.

13.10.3.1. Vasos de pressão que não permitam o exame interno ou externo por impossibilidade física devem ser alternativamente submetidos a Teste Hidrostático, considerando-se as limitações previstas no subitem 13.10.3.5.

São exemplos de vasos de pressão que não permitem o exame interno:

- Aqueles que não possuem bocas de visita ou aberturas que permitam a passagem de uma pessoa.
- Aqueles cujo diâmetro do casco não permite o acesso de uma pessoa.
- Trocadores de calor com espelho soldado ao casco, etc.

Equipamentos enterrados são exemplos de equipamentos que não permitem acesso externo.

13.10.3.2. Vasos com enchimento interno ou com catalisador podem ter a periodicidade de exame interno ou de Teste Hidrostático ampliada, de forma a coincidir com a época da substituição de enchimentos ou de catalisador, desde que esta ampliação não ultrapasse 20% do prazo estabelecido no subitem 13.10.3 desta NR.

São exemplos de enchimento interno de vasos de pressão:

- Argila.
- Carvão ativado.
- Aparas de aço.
- Anéis de *Rashig*.

- Enchimentos orientados.

Não deverão ser considerados como enchimento interno acessórios desmontáveis, tais como:

- Bandejas.
- *Demister*.
- Distribuidores.

13.10.3.3. Vasos com revestimento interno higroscópico devem ser testados hidrosticamente antes da aplicação do mesmo, sendo os testes subsequentes substituídos por técnicas alternativas.

Um exemplo típico de revestimento interno higroscópico é o revestimento refratário.

13.10.3.4. Quando for tecnicamente inviável e mediante anotação no Registro de Segurança pelo PH, citado no subitem 13.1.2, o Teste Hidrostático pode ser substituído por outra técnica de ensaio não-destrutivo ou inspeção que permita obter segurança equivalente.

O responsável pela definição das técnicas de inspeção que proporcionem segurança equivalente ao Teste Hidrostático é o PH.

São exemplos dessas técnicas:

- Ensaio ultra-sônico.
- Ensaio radiográfico.
- Ensaio com líquido penetrante.
- Ensaio com partículas magnéticas.
- Ensaio de estanqueidade.
- Apreciação do histórico de operação ou de inspeções anteriores.
- Técnicas de análise *leakage before breaking* (vazamento ocorre sempre antes da ruptura).

A decisão pela substituição do Teste Hidrostático por outras técnicas deverá fazer parte do relatório de inspeção de segurança correspondente, devidamente assinado pelo PH.

13.10.3.5. Considera-se como razões técnicas que inviabilizam o Teste Hidrostático:

- a) Resistência estrutural da fundação ou da sustentação do vaso incompatível com o peso da água que seria usada no teste.
- b) Efeito prejudicial do fluido de teste a elementos internos do vaso.
- c) Impossibilidade técnica de purga e secagem do sistema.
- d) Existência de revestimento interno.
- e) Influência prejudicial do teste sobre defeitos subcríticos.

As razões técnicas que inviabilizam o Teste Hidrostático citadas nesse item são as mais frequentes. Poderão existir outras razões que inviabilizem este teste além das citadas.

Razões meramente econômicas não deverão ser consideradas como restrições ao teste hidrostático. Se existirem sérias restrições econômicas, devem ser buscadas soluções alternativas de segurança equivalente.

São exemplos de internos que usualmente inviabilizam o teste:

- Revestimentos vitrificados.
- Revestimentos higroscópicos (refratários).
- Catalisadores que se danificam quando removidos.

Em contrapartida, não são consideradas razões técnicas que inviabilizam o teste: a existência de revestimentos pintados, cladeados, *lining*, etc.

13.10.3.6. Vasos com temperatura de operação inferior a 0°C e que operem em condições nas quais a experiência mostra que não ocorre deterioração, ficam dispensados do Teste Hidrostático periódico, sendo obrigatório exame interno a cada 20 anos e exame externo a cada dois anos.

Os vasos de pressão que operam abaixo de 0°C, vasos criogênicos, raramente estão sujeitos a deterioração severa. A inspeção interna frequente e o Teste Hidrostático poderão provocar fenômenos que comprometam sua vida útil.

Dessa forma a NR-13 não prevê a obrigatoriedade da execução do teste e estabelece prazos para inspeção interna de até 20 anos, valor este compatível com o previsto em outras legislações internacionais.

O detalhamento dos exames internos e externos deverá respeitar Normas de caráter voluntário internacionalmente reconhecidos.

As demais disposições da NR-13 também se aplicam aos vasos de pressão criogênicos.

13.10.3.7. Quando não houver outra alternativa, o Teste Pneumático pode ser executado, desde que supervisionado pelo PH, citado no subitem 13.1.2, e cercado de cuidados especiais, por tratar-se de atividade de alto risco.

13.10.4. As válvulas de segurança dos vasos de pressão devem ser desmontadas, inspecionadas e recalibradas por ocasião do exame interno periódico.

Os serviços previstos nesse item poderão ser realizados pela remoção da válvula e deslocamento para oficina ou no próprio local de instalação.

Caso os detalhes construtivos da válvula de segurança e da unidade permitam, poderá ser verificada a pressão de abertura, por meio de dispositivos hidráulicos, com o vaso de pressão em operação.

Os prazos estabelecidos nesse subitem para inspeção e manutenção das válvulas de segurança são máximos. Prazos menores deverão ser estabelecidos quando o histórico operacional das mesmas revele problemas em prazos menores do que os previstos para exame interno periódico do vaso. Dessa maneira, a inspeção das válvulas de segurança poderá ocorrer em datas defasadas do exame interno periódico.

Da mesma forma, quando os prazos para exame interno forem muito dilatados, como no caso de vasos criogênicos, prazos menores para inspeção das válvulas de segurança deverão ser estabelecidos.

13.10.5. A Inspeção de Segurança Extraordinária deve ser feita nas seguintes oportunidades:

- a) Sempre que o vaso for danificado por acidente ou outra ocorrência que comprometa sua segurança.
- b) Quando o vaso for submetido a reparo ou alterações importantes, capazes de alterar sua condição de segurança.
- c) Antes do vaso ser recolocado em funcionamento, quando permanecer inativo por mais de 12 meses.
- d) Quando houver alteração de local de instalação do vaso.

A Inspeção de Segurança Extraordinária pode abranger todo o vaso de pressão ou parte do mesmo, conforme a necessidade e a critério do PH.

13.10.6. A inspeção de segurança deve ser realizada por PH, citado no subitem 13.1.2, ou por Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, conforme citado no Anexo III.

Esse subitem refere-se a todos os tipos de inspeção de segurança, Inicial, Periódica ou Extraordinária.

O PH pode contar com a participação de inspetores e de técnicos de inspeção para inspeções de segurança.

Firmas especializadas podem ser utilizadas, desde que sejam inscritas no CREA e possuam PH.

13.10.7. Após a inspeção do vaso, deve ser emitido Relatório de Inspeção, que passa a fazer parte da sua documentação.

Entende-se que o término da inspeção ocorre quando o vaso de pressão é liberado para retornar à operação. A data de conclusão do Relatório Técnico não deve ser considerada como data de término da inspeção.

13.10.8. O Relatório de Inspeção deve conter no mínimo:

- a) Identificação do vaso de pressão.
- b) Fluidos de serviços e categoria do vaso de pressão.
- c) Tipo do vaso de pressão.
- d) Data de início e término da inspeção.
- e) Tipo de inspeção executada.
- f) Descrição dos exames e teste executados.
- g) Resultado das inspeções e intervenções executadas.
- h) Conclusões.
- i) Recomendações e providências necessárias.
- j) Data prevista para a próxima inspeção.

k) Nome legível, assinatura e número do registro no conselho profissional do PH, citado no subitem 13.1.2, e nome legível e assinatura de técnicos que participaram da inspeção.

13.10.9. Sempre que os resultados da inspeção determinarem alterações dos dados da placa de identificação, a mesma deve ser atualizada.

ANEXO II

CAMPO DE APLICAÇÃO DA NR 13

1. Esta NR deve ser aplicada aos seguintes equipamentos

a) Qualquer vaso cujo produto “P.V” seja superior a oito onde “P” é a máxima pressão de operação em KPa, e “V”, o seu volume geométrico interno em m³ incluindo:

- permutadores de calor, evaporadores e similares;
- vasos de pressão ou partes sujeitas a chama direta que não estejam dentro do escopo de outras NRs, nem do item 13.1. desta NR;
- vasos de pressão encamisados, incluindo refervedores e reatores;
- autoclaves e caldeiras de fluido térmico que não o vaporizem.

b) Vasos que contenham fluido da classe “A”, especificados no Anexo IV, independentemente das dimensões e do produto “P.V”.

2. Esta NR não se aplica aos seguintes equipamentos:

a) Cilindros transportáveis, vasos destinados ao transporte de produtos, reservatórios portáteis de fluido comprimido e extintores de incêndio.

b) Os destinados à ocupação humana.

c) Câmara de combustão ou vasos que façam parte integrante de máquinas rotativas ou alternativas, tais como bombas, compressores, turbinas, geradores, motores, cilindros pneumáticos e hidráulicos e que não possam ser caracterizados como equipamentos independentes.

d) Dutos e tubulações para condução de fluido.

e) Serpentinhas para troca térmica.

f) Tanques e recipientes para armazenamento e estocagem de fluidos não enquadrados em Normas e códigos de projeto relativos a vasos de pressão.

g) Vasos com diâmetro interno inferior a 150 mm para fluidos da classe “B”, “C” e “D”, conforme especificado no Anexo IV.

Coletores, por exemplo, *header*, *manifold*, etc. de vapor ou outros fluidos, lançadores ou recebedores de “PIG” não devem ser considerados como vasos de pressão.

Trocadores de calor poderão ter sua categoria estabelecida de duas formas diferentes:

1º Considerando-se a categoria mais crítica entre o casco e o cabeçote (carretel).

2º Considerando-se o casco como um vaso de pressão e o cabeçote como outro vaso de pressão.

Esta NR não se aplica a vasos intimamente ligados a equipamentos rotativos ou alternativos, pois entende-se que, além dos esforços de pressão, estes equipamentos estão sujeitos a esforços dinâmicos que poderão provocar fadiga, corrosão fadiga, etc. Entende-se que tais vasos sejam cobertos por Normas específicas mais rigorosas que a NR-13. São exemplos dessa situação:

- Cárter de motores a combustão.
- Volutas de bombas.
- Cilindros hidráulicos.
- Carcaças de bombas e compressores.

Vasos de pressão instalados em pacotes com objetivo único de redução de espaço físico ou facilidade de instalação não são considerados como integrantes de máquinas e, portanto, estão sujeitos aos requisitos da NR-13 quando o $P.V > 8$. Exemplos dessa situação:

- pulmões de ar comprimido que suportam pequenos compressores alternativos;
- trocadores de calor para resfriamento de água ou óleo de máquinas rotativas;
- amortecedores de pulsação de compressores e de bombas;
- filtros;
- cilindros rotativos pressurizados.

Recipientes criogênicos para estocagem de gases liquefeitos derivados do ar, tais como oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono, etc., quando fabricados segundo Normas e códigos de projeto específicos, não-relativos a vasos de pressão, deverão ser enquadrados no Anexo II, item 2, alínea “f” pela NR-13.

ANEXO III

CLASSIFICAÇÃO DE VASOS DE PRESSÃO

1. Para efeito desta NR, os vasos de pressão são classificados em categorias segundo o tipo de fluido e o potencial de risco.

1.1. Os fluidos contidos nos vasos de pressão são classificados conforme descrito a seguir:

CLASSE “A”:

- fluidos inflamáveis;
- combustível com temperatura superior ou igual a 200°C;
- fluidos tóxicos com limite de tolerância igual ou inferior a 20ppm;
- hidrogênio;
- acetileno.

CLASSE “B”:

- fluidos combustíveis com temperatura inferior a 200°C;
- fluidos tóxicos com limite de tolerância superior a 20ppm.

CLASSE “C”:

- vapor de água, gases asfixiantes simples ou ar comprimido.

CLASSE “D”:

– água ou outros fluidos não enquadrados nas classes “A”, “B” ou “C”, com temperatura superior a 50°C.

1.1.1. Quando se tratar de mistura, deverá ser considerado para fins de classificação o fluido que apresentar maior risco aos trabalhadores e instalações, considerando-se sua toxicidade, inflamabilidade e concentração.

1.2. Os vasos de pressão são classificados em grupos de potencial de risco em função do produto “P.V”, onde “P” é a pressão máxima de operação em MPa, e “V”, o seu volume geométrico interno em m³, conforme segue:

- GRUPO 1: P.V \geq 100;
- GRUPO 2: P.V < 100 e P.V \geq 30;
- GRUPO 3: P.V < 30 e P.V \geq 2,5;
- GRUPO 4: P.V < 2,5 e P.V \geq 1;
- GRUPO 5: P.V < 1.

1.2.1. Vasos de pressão que operem sob a condição de vácuo deverão enquadrar-se nas seguintes categorias:

- CATEGORIA I – para fluidos inflamáveis;
- CATEGORIA V – para outros fluidos.

1.3. A tabela a seguir classifica os vasos de pressão em categorias de acordo com os grupos de potencial de risco e a classe de fluido contido.

| Classe do Fluido | Grupo potencial de risco | | | | |
|------------------|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| | GRUPO 1 | GRUPO 2 | GRUPO 3 | GRUPO 4 | GRUPO 5 |
| | Categoria | | | | |
| A | I | I | II | III | III |
| B | I | II | III | IV | V |
| C | I | II | III | IV | V |
| D | II | III | IV | V | V |

NOTAS: a) considerar volume em m³ e Pressão em MPa e; b) considerar 1 MPa correspondendo a 10,197 Kgf/cm².

A classificação dos fluidos em inflamáveis e combustíveis deve atender às prescrições da NR-20.

Sempre deverá ser considerada a condição mais crítica. Por exemplo, se um gás for asfixiante simples (fluido Classe C) e inflamável (fluido Classe A) deverá ser considerado como inflamável.

A temperatura a ser utilizada para classificação é a de operação do vaso de pressão.

A toxicidade dos fluidos deve atender ao previsto nas NRs. Caso os limites de tolerância para o fluido ou mistura não estejam contemplados, deverão ser utilizados valores aceitos internacionalmente.

Quando um vaso de pressão contiver mistura de fluido, deverá ser considerado para fins de classificação o fluido que apresente maior risco aos trabalhadores, instalações e meio ambiente, desde que sua concentração na mistura seja significativa, a critério do estabelecimento.

Para efeito de classificação, os valores de pressão máxima de operação poderão ser obtidos a partir dos dados de engenharia de processo, das recomendações do fabricante do vaso de pressão, ou das características funcionais do equipamento.

Caso seja significativo, poderão ser descontados do volume geométrico interno do vaso de pressão o volume ocupado por internos não-porosos.

Todo vaso de pressão cujo produto “P.V” seja maior que oito é enquadrado na NR-13. Os vasos cujo produto “P.V” seja superior a oito, porém cujo fluido não se enquadre nas classes definidas no Anexo IV, deverão ter sua categoria atribuída em função do histórico operacional e do risco oferecido aos trabalhadores e instalações, considerando-se: toxicidade, inflamabilidade e concentração. Para cálculo do produto “P.V” a pressão deve estar em KPa.

Os valores de pressão máxima de operação a serem utilizados para cálculo do produto “P.V” na tabela do Anexo IV deverão estar em Megapascal (Mpa).

Água abaixo de 50°C e outros fluidos que não se enquadrem nas classes listadas neste anexo deverão ser enquadrados como classe “D”.