VITOR SILVEIRA MEDEIROS

Metodologia para análise de riscos da utilização de amônia em uma
instalação de produção de hexafluoreto de urânio

São Paulo

2019

VITOR SILVEIRA MEDEIROS

Metodologia para análise de riscos da utilização de amônia em uma
instalação de produção de hexafluoreto de urânio

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para a obtenção do título de Mestre em
Ciências

Área de concentração:
Engenharia Naval e Oceânica

Orientador:
Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins

São Paulo
2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Medeiros, Vitor Silveira

Metodologia para análise de riscos da utilização de amônia em uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio / V. S. Medeiros -- versão corr. -- São Paulo, 2019.

121 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica.

1.Análise de risco 2.Avaliação de risco 3.Amônia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica II.t.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente e sobretudo a Deus, pela oportunidade da realização deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Ramos Martins, pela dedicação, suporte e atenção no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus colegas do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo, em especial ao Daniel, ao Márcio e à Isabela, pelas valiosas contribuições e sugestões.

À equipe do LabRisco, especialmente à Adriana, ao Marco, ao Márcio e à Vilma, pelas ajudas, colaborações e explicações.

Finalmente, à meus pais, à minha irmã e à minha noiva Patrícia, que são a minha base de tudo, pela compreensão, carinho, apoio e estímulo em todos os momentos. Sem eles nada disto seria possível.

RESUMO

Substâncias armazenadas e utilizadas em instalações nucleares, tal qual em indústrias convencionais, trazem um perigo inerente devido às suas características físico-químicas. Entre as substâncias de larga utilização em ambos os tipos de indústrias está a amônia, que apresenta características de toxicidade e inflamabilidade, e deve receber cuidado especial no seu armazenamento e utilização. Dessa forma, uma análise de risco tem relevância tanto em termos legais – com foco na obtenção de licenças – quanto na forma de subsídios para o projeto da instalação. Com tal enfoque, este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia completa para a análise do risco (tanto individual quanto social) do armazenamento de amônia numa instalação de produção de hexafluoreto de urânio. Isso é realizado através de um vasto levantamento de técnicas e modelos de análise qualitativa e quantitativa, seguido da seleção e proposição daqueles mais adequados ao tipo de instalação foco desta dissertação. Por fim, é verificada a adequação da metodologia proposta através de sua aplicação em um estudo de caso real.

Palavras-chave: Análise de risco. Avaliação de risco. Amônia. Produção de hexafluoreto de urânio.

ABSTRACT

Substances stored and utilized in nuclear installations, as in conventional industries, bring an inherent danger due to their physico-chemical characteristics. Among the widely used substances is ammonia, which presents toxic and flammable characteristics, and should receive special treatment in its storage and use. Thus, a risk analysis has relevance both in legal terms – focused on obtaining licenses – and as insights to the installation design. With such an approach, this work has as objective to propose a complete methodology for the risk analysis (both individual and societal) of the ammonia storage in a uranium hexafluoride production installation. This is done through a large survey of techniques and models of qualitative and quantitative analysis, followed by selection and proposition of those most appropriated to the type of installation that is the focus of this work. Lastly, the appropriateness of the proposed methodology is checked through its application to a real case study.

Keywords: Risk analysis. Risk assessment. Ammonia. Uranium hexafluoride production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo da estrutura de uma árvore de eventos.....	30
Figura 2 – Exemplo de condição de Markov	33
Figura 3 – Exemplo de cobertor de Markov (Maturana, 2010)	33
Figura 4 – Exemplos de d-separação (Adaptado de Maturana, 2010)	34
Figura 5 – Tipos de análises de inferência (Adaptada de Maturana, 2010)	35
Figura 6 – Dispersão de nuvem densa formada devido a jato vertical e com ação de vento lateral (Adaptada de TNO, 2005).....	41
Figura 7 – Sequência de ações da metodologia proposta	52
Figura 8 – Esquema simplificado do sistema estudado	60
Figura 9 – Rede bayesiana para o processo de abastecimento.....	65
Figura 10 – Rede bayesiana para o processo de estocagem	73
Figura 11 – Rede bayesiana para o processo de distribuição.....	78
Figura 12 – Risco individual	97
Figura 13 – Risco social	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultados obtidos em uma análise <i>What-if</i> (Adaptado de ABS, 2003)...	21
Tabela 2 – Resultados obtidos em uma APP	22
Tabela 3 – Resultados obtidos em um Hazop (Adaptado de ABS, 2003)	23
Tabela 4 – Símbolos para a representação de eventos em uma árvore de falhas....	27
Tabela 5 – Portões lógicos para uma árvore de falhas	28
Tabela 6 – Conjunção de Probabilidades das variáveis A e B	32
Tabela 7 – Categorias de frequências de ocorrência para a APP.....	62
Tabela 8 – Categorias de impactos para a APP.....	62
Tabela 9 – Matriz de riscos para a APP	62
Tabela 10 – Dados dos componentes envolvidos no processo de abastecimento ...	66
Tabela 11 – Dados dos componentes envolvidos no processo de estocagem	74
Tabela 12 – Dados dos componentes envolvidos no processo de distribuição.....	79
Tabela 13 – Frequências anuais de vazamento.....	82
Tabela 14 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da rede bayesiana de abastecimento.....	83
Tabela 15 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da rede bayesiana de abastecimento.....	84
Tabela 16 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da rede bayesiana de estocagem	85
Tabela 17 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da rede bayesiana de estocagem	85
Tabela 18 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da rede bayesiana de distribuição	86
Tabela 19 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da rede bayesiana de distribuição	86
Tabela 20 – Dados climáticos adotados.....	88
Tabela 21 – Resultados de formação de poça.....	88
Tabela 22 – Resultados de incêndio em nuvem.....	89
Tabela 23 – Resultados de toxicidade	90
Tabela 24 – Distâncias para níveis de radiação devido a jato de fogo.....	91
Tabela 25 – Distâncias para níveis de radiação devido à incêndio em poça	94

Tabela 26 – Probabilidades de direção de vento	95
Tabela 27 – Quantitativo populacional do entorno por período	95
Tabela 28 – Maiores contribuidores para o risco.....	99

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	5
Lista de Tabelas.....	6
1 Introdução	11
1.1 Objetivo.....	11
1.2 Justificativa	12
1.3 Estrutura da dissertação.....	12
2 Revisão Bibliográfica.....	14
3 Fundamentação teórica.....	17
3.1 Conceitos gerais	17
3.1.1 Perigo e Risco	17
3.1.2 Análise qualitativa e análise quantitativa	19
3.1.3 Análise, avaliação e gerenciamento de riscos.....	19
3.2 Identificação de perigos	20
3.2.1 Análise What-if	20
3.2.2 Análise Preliminar de Perigos (APP).....	21
3.2.3 Estudo de Perigos e Operabilidade	22
3.2.4 Análise de Modos de Falha e Efeitos	24
3.3 Probabilidades de ocorrência	25
3.3.1 Conceitos gerais.....	25
3.3.1.1 Axiomas da probabilidade	25
3.3.1.2 Probabilidade condicional e independência	26
3.3.2 Árvore de falhas	27
3.3.3 Árvore de eventos	29
3.3.4 Redes Bayesianas.....	30
3.3.4.1 Conjunção de Probabilidades.....	31
3.3.4.2 Características do grafo	32
3.3.4.3 Inferência.....	34
3.3.4.3.1 Inferência exata	35
3.3.4.3.2 Inferência aproximada	36
3.4 Análise de consequências	37
3.4.1 Modelos de formação, dispersão e evaporação de poça	37

3.4.1.1	Modelo GASP (Gas accumulation over spreading pools)	37
3.4.1.2	Modelo PVAP (Pool vaporization)	38
3.4.2	Modelos de dispersão de nuvem.....	39
3.4.2.1	Modelos para dispersão de nuvem densa.....	39
3.4.2.2	Modelos de dispersão de nuvem passiva	42
3.4.2.3	Unified Dispersion Model (UDM)	43
3.4.2.4	Modelos de fluidodinâmica computacional (CFD)	44
3.4.3	Toxicidade	44
3.4.4	Modelos de explosão/incêndio em nuvem.....	45
3.4.4.1	Modelos de carga equivalente de TNT.....	46
3.4.4.2	Modelo Multi-Energy	46
3.4.4.3	Modelo Baker-Strehlow	47
3.4.5	Modelos de radiação térmica	48
3.4.5.1	Modelos de incêndio em jato.....	48
3.4.5.2	Modelos de incêndio em poça.....	49
3.4.5.3	Modelos de bola de fogo	49
3.4.6	Modelos de BLEVE	50
3.4.6.1	Modelo Baker et al.	50
4	Metodologia.....	52
4.1	Familiarização.....	53
4.2	Identificação de perigos	53
4.3	Estimativa das probabilidades de ocorrência.....	53
4.4	Estimativa das consequências.....	54
4.4.1	Formação de poça.....	54
4.4.2	Dispersão de nuvem.....	55
4.4.3	Toxicidade	55
4.4.4	Sobrepresão	55
4.4.5	Radiação térmica.....	56
4.5	Cálculo do risco	56
4.6	Avaliação dos resultados	56
5	Estudo de Caso.....	58
5.1	Familiarização.....	58
5.2	Identificação de perigos	61

5.3 Estimativa das probabilidades de ocorrência.....	63
5.3.1 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de abastecimento.....	63
5.3.2 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de estocagem	72
5.3.3 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de distribuição	77
5.3.4 Probabilidades de ocorrência e diagnóstico de causas mais prováveis ..	82
5.4 Estimativa das consequências.....	87
5.4.1 Formação de poça.....	88
5.4.2 Dispersão de nuvem.....	89
5.4.3 Toxicidade	90
5.4.4 Sobrepressão	90
5.4.5 Radiação térmica.....	91
5.4.5.1 Jato de fogo.....	91
5.4.5.2 Incêndio em poça	93
5.4.5.3 Bola de fogo	94
5.5 Cálculo de risco	95
5.6 Avaliação dos resultados	99
6 Conclusões.....	100
Referências	101
APÊNDICE A – Análise Preliminar de Perigos.....	105
APÊNDICE B – Tabelas de Probabilidades Condicionais	109

1 Introdução

O licenciamento de uma unidade de fabricação de combustível nuclear requer estudos detalhados para a quantificação dos riscos que tal empreendimento possa trazer aos indivíduos do público no seu entorno. Tais riscos são inerentes aos materiais armazenados e utilizados nesse tipo de processo.

Entre as etapas da fabricação do combustível nuclear, caso o objetivo seja a produção de combustível nuclear com urânio enriquecido, está a produção de hexafluoreto de urânio (UF_6), substância que é posteriormente utilizada no processo de enriquecimento isotópico do urânio. Esta produção é realizada através do processamento da substância conhecida como *yellowcake* para a produção do UF_6 . Entre os processos químicos realizados para a obtenção do UF_6 está a redução do nitrato de urânio (NTU) a diuranato de amônio (DUA), através de reação com a amônia (NH_3).

Apesar desse processo específico estar relacionado à indústria nuclear, a amônia possui larga utilização em diversos tipos de indústrias, com destaque para os sistemas de refrigeração e na produção de produtos químicos e fertilizantes agrícolas.

Para a utilização da amônia, se faz necessário o armazenamento de um inventário suficientemente grande desta, o que traz consigo um risco inerente, uma vez que essa substância possui características de toxicidade e inflamabilidade.

Dessa forma, uma análise de riscos, além de ser uma atividade necessária num processo de licenciamento, tem também grande valia na tentativa de se adotar medidas de redução e controle do risco, de forma a se contribuir para a melhoria da segurança desse tipo de instalação.

1.1 Objetivo

O presente trabalho objetiva a proposição de uma metodologia completa e prática para a análise dos riscos individuais e sociais associados à utilização de amônia em uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio.

Para tanto, o trabalho analisa aspectos característicos das principais técnicas disponíveis na literatura, fazendo considerações sobre seus pontos fortes e fracos,

sua aplicabilidade no sistema proposto e, com base nessa análise, será proposta uma metodologia composta pelas técnicas mais adequadas.

Como forma de auxiliar na sua avaliação e o entendimento da metodologia proposta, é realizado um estudo de caso para ilustrar a aplicação prática da metodologia proposta.

1.2 Justificativa

A amônia é um produto químico que é largamente utilizado em processos industriais, em atividades que vão da refrigeração à produção de fertilizantes. Essa substância é considerada perigosa por apresentar características tóxicas e inflamáveis, devendo, portanto, ser manuseada com restrições.

Instalações de produção de hexafluoreto de urânio, uma das diversas presentes no processo de fabricação de combustível nuclear, se utilizam, entre seus principais insumos, da amônia, armazenando comumente grandes volumes desse produto.

Assim, esse tipo de instalação requer grandes cuidados quanto ao armazenamento e utilização da amônia, e uma análise de riscos torna-se indispensável.

Esta, por sua vez, apesar de já ter seu conceito consolidado, pode sempre ser aprimorada com a introdução de novas técnicas entre suas etapas. Neste sentido, este trabalho vem propor uma metodologia de análise de riscos voltada especificamente a este tipo de instalação.

1.3 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em seis capítulos. O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica de trabalhos com temática similar no todo ou em parte à esta dissertação.

O Capítulo 3 trata de conceitos teóricos que serão úteis para o entendimento desta dissertação, sendo dividido em quatro subitens: conceitos gerais, identificação de perigos, probabilidade de ocorrência e análise de consequências.

No Capítulo 4 é apresentada a metodologia proposta no presente trabalho, justificando-se a escolha das técnicas selecionadas.

No Capítulo 5 é aplicada a metodologia proposta anteriormente em um sistema real de armazenamento de amônia, de forma a se fazer uma análise dos riscos associados à utilização dessa substância no tipo de instalação estudado.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões sobre os resultados obtidos no capítulo anterior, avaliando-se a aplicabilidade e a utilidade da metodologia proposta.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas na elaboração do presente trabalho, e que poderão ser consultadas para aprofundamento nos conceitos apresentados.

2 Revisão Bibliográfica

Instalações de produção de hexafluoreto de urânio, tal qual outras instalações do processo de fabricação de combustíveis nucleares, são demandadas a atuar com grande atenção às questões relacionadas à segurança. Tal afirmação pode ser confirmada pelas diversas exigências que órgãos reguladores fazem para o licenciamento desse tipo de instalação no sentido de melhoria da segurança, conforme é possível se identificar em regulamentações como a norma CNEN NE 1.04 (2002), que traz a regulação do processo de licenciamento de instalações nucleares no Brasil.

Da mesma forma, no meio acadêmico também são identificados diversos trabalhos com enfoque no risco de instalações de produção de hexafluoreto de urânio. Por exemplo, Canu et al. (2009) apresentam em seu trabalho uma avaliação comparativa dos perigos da exposição de trabalhadores a agentes físicos, químicos e radiológicos presentes em instalações de produção de UF_6 localizadas na França. Os autores avaliam dados do período de 1960 a 2006, organizando as informações coletadas na forma de uma matriz de exposição e identificando a importância de outras substâncias além do urânio para a segurança dos trabalhadores – entre elas, a amônia.

A segurança ocupacional também é o enfoque principal de Jerônimo (2013), que, em seu trabalho, apresenta uma metodologia para o monitoramento dos riscos aos trabalhadores – incluindo os associados à amônia – em instalações do ciclo do combustível nuclear, objetivando a melhoria da prevenção de tais riscos. Portanto, observando a série de trabalhos e sua variada temática relacionada aos perigos das instalações de produção de UF_6 , é possível notar que o enfoque em segurança está sempre presente nos processos relacionados à produção de hexafluoreto de urânio. Já Santos et al. (2016) apresentam em seu trabalho uma proposta de metodologia para o levantamento das funções críticas de segurança – conceito desenvolvido, como mostram os autores, após o acidente nuclear de *Three Mile Island*, aplicado regularmente a reatores nucleares e utilizado para a melhoria do gerenciamento dos riscos da instalação – para uma planta de produção de hexafluoreto de urânio, aplicando a metodologia no projeto de uma planta real; tal levantamento pode,

segundo Santos et al. (2016), servir de base para um sistema de monitoramento baseado nas funções críticas de segurança da instalação.

Mohsendokht (2017) faz uma avaliação do risco de um vazamento de UF_6 quantificando a probabilidade de ocorrência de uma liberação através da utilização da técnica de árvore de falhas. Para a obtenção de dados de confiabilidade de equipamentos e ações humanas o autor utilizou lógica *fuzzy* e opinião de especialistas. Além disso Mohsendokht (2017) realizou também análises de importância e sensibilidade, de forma a avaliar a contribuição de cada componente para o vazamento e identificar os pontos frágeis da instalação.

De maneira análoga, a utilização da amônia, nas diversas indústrias que tem essa substância como um de seus insumos, também ocorre com grande atenção para seus perigos e para sua utilização de forma segura. Isso é identificado tanto em termos reguladores – como, por exemplo, na norma da Cetesb P4.261 (2011), que dá diretrizes para a elaboração de uma análise de risco no estado de São Paulo – quanto em estudos acadêmicos.

Nessa área, diversos trabalhos são encontrados na literatura relacionados à identificação e avaliação dos riscos da amônia. Por exemplo, Nielsen et al. (1997) apresentam os resultados de experimentos de campo com dispersão atmosférica de amônia em liberações contínuas. Os experimentos foram realizados, conforme apresentam os autores, com objetivo de identificar todos os estágios da dispersão, desde a liberação na fonte até a entrada da nuvem em regime de dispersão passivo. Já Sung e Wheeler (1997) apresentam em seu trabalho uma caracterização de liberações acidentais de amônia a partir de diversas condições de armazenagem e processamento da substância, destacando as possíveis características para a dispersão da amônia em caso de vazamento, dependendo das condições do processo. Os autores também apresentam uma visão geral dos problemas associados à caracterização das fontes de vazamento de amônia e avaliam como alguns modelos matemáticos tratam tais problemas.

Haddad et al. (2010) discutem em seu trabalho sobre os riscos associados à estocagem de amônia e seus sistemas de segurança em uma planta industrial na Jordânia. Para isso, os autores realizaram uma análise que inclui cenários com falhas em tanques e em tubulações, em diferentes operações, porém limitando o estudo a acidentes de maior porte.

Já Roy et al. (2011) apresentam uma avaliação de riscos de uma unidade de estocagem de amônia também localizada na Índia. Nesse trabalho, Roy et al. (2011) avaliam os resultados obtidos através da utilização de técnicas qualitativas e quantitativas, sugerindo alterações no treinamento dos operadores e nas manutenções da planta. Além disso os autores realizam análises de sensibilidade para a determinação do efeito da incorporação de tais sugestões na segurança do sistema.

Em outro estudo, Mizuta e Nakagawa (2013) apresentam uma metodologia para analisar quantitativamente os perigos de plantas químicas, além de propor medidas de segurança para a redução das consequências. Para isso, os autores apresentam como exemplo uma análise das consequências de cenários de liberação de amônia numa planta de produção da substância.

Finalmente, Anjana, Amarnath e Harindranathan Nair (2018) apresentam uma análise das consequências de uma liberação acidental de amônia em uma instalação de estocagem da substância localizada na Índia, incluindo a utilização de sistemas de informação geográfica (GIS) para a avaliação da área e da população afetadas devido aos impactos tóxicos decorrentes da dispersão da nuvem de amônia no ar.

Como pode ser observado, é possível notar a importância com que são tratadas as questões relacionadas à segurança, tanto em instalações de produção de hexafluoreto de urânio quanto naquelas que manipulam amônia em seus processos.

3 Fundamentação teórica

Alguns conceitos teóricos fundamentais para o bom entendimento do trabalho serão apresentados e discutidos neste capítulo. Tais conceitos estão divididos em quatro blocos: conceitos gerais, identificação de perigos, probabilidade de ocorrência e análise de consequências.

Na primeira seção são apresentadas as definições de diversos conceitos genéricos que servirão de base para o entendimento geral do trabalho.

No item de identificação de perigos, as principais técnicas disponíveis na literatura são discutidas, destacando suas características e possíveis utilizações.

Na sequência, na seção Probabilidades de Ocorrência, são destacados os conceitos teóricos das principais técnicas disponíveis, além de uma breve explicação de suas utilizações.

Por fim, o tópico de análise de consequências discute os modelos matemáticos apresentados na literatura para a modelagem de liberação e dispersão de substâncias químicas perigosas inflamáveis e/ou tóxicas.

3.1 Conceitos gerais

Nesta seção serão apresentados conceitos básicos que contribuirão para um melhor acompanhamento dos conceitos tratados nas seções subsequentes.

Com esse intuito, as subseções seguintes apresentam e discutem os seguintes conceitos: perigo e risco; análise qualitativa e análise quantitativa; e análise, avaliação e gerenciamento de riscos.

3.1.1 Perigo e Risco

Uma importante diferenciação deve ser feita entre os termos perigo e risco, que com frequência são utilizados de maneira inadvertida e errônea, ou até mesmo como sinônimos.

Um perigo é algo intrínseco às características de um material, ou seja, como define Cetesb (2011), perigo é o conjunto de condições físicas ou químicas com potencial de causar danos às pessoas, à propriedade e/ou ao meio ambiente. Assim, o perigo

está associado exclusivamente às características de determinado produto, não podendo ser reduzido ou eliminado.

Já o conceito de risco, conforme define Martins (2013), é utilizado para avaliar o potencial efeito de um acidente em termos da sua probabilidade de ocorrência e da magnitude das suas consequências.

De uma maneira geral, risco pode ser entendido pela combinação dos fatores representada na Eq. (1):

$$R = \sum_i P_i \cdot C_i \quad (1)$$

onde R representa o risco total de determinado sistema, P_i representa a frequência de ocorrência de um evento acidental i , e C_i representa as consequências desse mesmo evento i . Ou seja, quando o termo risco é utilizado, ele possui implicitamente as características de frequência de ocorrência e consequências do possível acidente.

O risco pode ser analisado sob diversos aspectos, sendo os mais comumente observados o risco à vida humana, o risco ao meio ambiente, o risco à propriedade e o risco à imagem da empresa.

O risco associado a pessoas pode ser subdividido em dois, o risco social e o risco individual. O chamado risco social é aquele atribuído ao coletivo de pessoas presentes na área possivelmente afetada pelo evento acidental. Esse risco é apresentado na forma de curvas f-N, que cruzam as informações do número de fatalidades N entre o grupo de indivíduos considerados com a frequência f de ocorrência do evento acidental. Tal valor pode, então, ser comparado com padrões exigidos pela legislação ou aceitos como adequados para verificar se o risco da instalação analisada pode ser considerado tolerável.

Risco individual é um valor de frequência que representa o risco ao qual um único indivíduo está submetido devido à presença de um ou mais perigos. Este risco pode também ser apresentado visualmente na forma de curvas de isorisco, que são curvas com determinados valores de risco de interesse a partir do ponto onde ocorre a liberação acidental, que são apresentadas em imagens que consideram a instalação como um todo e seu entorno, tais como fotos aéreas, imagens de satélites ou mapas.

3.1.2 Análise qualitativa e análise quantitativa

Uma importante consideração a ser feita é em relação à diferenciação entre uma análise qualitativa e uma análise quantitativa.

Uma análise qualitativa de risco estuda em termos qualitativos os possíveis riscos da instalação objeto de estudo, considerando suas possíveis consequências e probabilidade de ocorrência.

Tal estudo é feito baseado em uma matriz de riscos, que apresenta a combinação de tabelas com categorias de frequências e categorias de consequências. Um exemplo de matriz de riscos pode ser encontrado em Martins (2013). Vale ressaltar a importância da definição de tais tabelas de categorização previamente ao estudo, de forma a se evitar uma análise tendenciosa, ou que a análise possa ser alterada devido aos resultados observados na matriz.

Quando algum cenário avaliado qualitativamente tem seu risco considerado alto, este é avaliado de maneira quantitativa, num processo onde se estima a frequência de ocorrência de tal cenário e suas consequências, através de modelos matemáticos, de forma a se obter um valor para o risco, que será, então, comparado com um critério de tolerabilidade.

3.1.3 Análise, avaliação e gerenciamento de riscos

Os termos análise, avaliação e gerenciamento de riscos são frequentemente confundidos e, embora possuam significados semelhantes, apresentam diferenças fundamentais.

Uma análise de riscos tem como objetivo, conforme apresenta Martins (2013), a determinação do risco associado a um dado sistema, a partir da frequência de ocorrência de um evento de perigo e sua respectiva consequência.

Por outro lado, a avaliação de riscos se utiliza dos resultados da análise de riscos para, através da comparação com critérios pré-definidos, poder realizar a tomada de decisão e, conforme cita a Cetesb (2011), definir a estratégia de gerenciamento de riscos.

Por fim, o gerenciamento de riscos contempla a aplicação de medidas que possam reduzir ou minimizar os riscos identificados, além do monitoramento contínuo da instalação, de forma a se evitar o aumento dos riscos desta por eventuais alterações. Além disso, conforme cita Martins (2013), caso o sistema seja submetido a uma condição fora das especificadas, uma nova análise e avaliação de riscos devem ser realizadas.

3.2 Identificação de perigos

O processo de identificação de perigos busca identificar possíveis cenários que possam levar à ocorrência de acidentes, mas, além disso, também é útil no sentido de identificar os eventos capazes de levar tais perigos a ocasionar acidentes, e também suas possíveis consequências.

A identificação de perigos tem como propósito identificar e listar o conjunto de perigos e cenários acidentais associados, priorizados pelos níveis de risco específicos para o problema em questão (Martins, 2013).

Como apresentado por Spouge (1999), a identificação de perigos inclui um grupo de técnicas relativamente simples que ajudam no entendimento do alcance e da magnitude dos perigos em uma instalação, e sugerem medidas apropriadas de prevenção, mitigação e controle.

Neste tipo de análise, um fator importante é a seleção da equipe de especialistas que vão desenvolver a técnica. Um grupo heterogêneo, que inclui especialistas na técnica a ser aplicada atuando conjuntamente com especialistas no projeto e na operação da planta estudada, é importante para a obtenção de um melhor resultado. Algumas das diversas técnicas disponíveis para a identificação dos perigos associados a uma determinada instalação serão apresentadas a seguir.

3.2.1 Análise *What-if*

Martins (2013) relata que a técnica de análise *what-if* trata-se de uma técnica onde os perigos são levantados através das opiniões de especialistas, em geral se utilizando de seções de *brainstorming*.

Essa é uma técnica considerada de simples aplicação, uma vez que possui um procedimento pouco complexo, baseando-se basicamente no questionamento “e se...?” para fazer o levantamento dos perigos.

Como resultado, a técnica *what-if* apresenta uma descrição qualitativa de potenciais perigos na forma de perguntas e respostas, além de recomendações para a prevenção dos perigos identificados (Martins, 2013).

A Tabela 1, adaptada de ABS (2003), apresenta um exemplo de tabela contendo o resultado da aplicação da técnica *what-if* para a identificação de perigos associados a um sistema de compressão de ar a bordo de uma embarcação.

Tabela 1 – Resultados obtidos em uma análise *What-if* de sistema de compressão de ar a bordo de uma embarcação (Adaptado de ABS, 2003)

E se...?	Condições de operação	Consequências na operação	Mitigação	Classificação do risco	Recomendações
1. O filtro de entrada de ar for parcialmente obstruído?	Redução do fluxo de ar do compressor, afetando seu desempenho	Operação ineficiente do compressor, resultando em consumo excessivo de energia e possível dano ao compressor	Instalação de válvula de alívio de vácuo entre o filtro e o compressor	Risco médio (consequência média; frequência média)	Incluir verificação de pressão na entrada do compressor como parte da rotina diária de manutenção
2. A válvula de dreno do compressor for deixada aberta?	Liberação de grande fluxo de ar para a atmosfera	Baixo ou nenhum fluxo de ar disponível, causando ineficiência e possível interrupção	Instalação de uma pequena linha de dreno, porém esta ação poderia dificultar a manutenção da pressão	Risco baixo (consequência baixa; frequência média)	-
3. ...	...	...	...	...	...

3.2.2 Análise Preliminar de Perigos (APP)

A Análise Preliminar de Perigos (APP), técnica que teve origem no programa de segurança militar do Departamento de Defesa dos Estados Unidos, tem como

objetivo, conforme mostra USNRC (1981), identificar potenciais condições perigosas inerentes a um sistema e determinar a significância ou criticalidade do potencial acidente.

O primeiro passo em uma APP é identificar elementos e componentes potencialmente perigosos no sistema. O segundo, é a identificação de eventos que podem possibilitar a transformação de condições perigosas específicas em potenciais acidentes. Então, a gravidade desse potencial acidente é avaliada para se identificar as medidas preventivas que podem ser tomadas (USNRC, 1981). Vale ressaltar a necessidade da definição prévia das categorias de probabilidade de ocorrência, de consequências, e da matriz de riscos a ser utilizada, de forma a se fazer uma classificação de importância dos eventos adequada.

Conforme cita Martins (2013), uma APP registra, em forma tabular, as causas e consequências associadas a cada evento de perigo identificado, além da classificação do correspondente risco, baseando-se na avaliação qualitativa de sua probabilidade de ocorrência e do correspondente impacto caso o potencial perigo se transforme em um acidente.

Diversas possíveis tabelas para a organização dos resultados de uma APP podem ser encontradas na literatura, como em Cetesb (2011) e Mannam (2005). Como exemplo, é apresentada a Tabela 2, utilizada no trabalho de Martins e Goyano (2007).

Tabela 2 – Resultados obtidos em uma APP (Martins e Goyano, 2007)

Sub sistema	Perigo	Potenciais causas	Consequências	Avaliação da probabilidade de ocorrência	Avaliação do impacto	Risco	Classificação
...	...	...	...	...	...	...	...

3.2.3 Estudo de Perigos e Operabilidade

A Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – Cetesb (2011) define o Estudo de Perigos e Operabilidade (do inglês *Hazard and Operability Studies* – Hazop) como sendo uma técnica para a identificação de perigos projetada para estudar possíveis desvios de projeto ou operação de uma instalação. Conforme apresentado

pela Cetesb, o Hazop consiste em uma revisão da instalação a fim de identificar potenciais perigos.

Essa técnica utiliza-se de uma tabela onde são inseridas palavras-chave de possíveis desvios das condições de processo. Esses desvios são avaliados em pontos determinados do sistema, chamados nós.

Mais detalhadamente, conforme mostra Martins (2013), a técnica utiliza palavras-chaves relacionadas a potenciais desvios das condições de operação previstas, combinando adjetivos (mais, menos, alto, nenhum, etc.) com parâmetros físicos fundamentais (pressão, vazão, temperatura, etc.), e, conforme ABS (2003), tenta induzir um grupo de especialistas de determinado sistema a identificar potenciais perigos relacionados a parte dos equipamentos ou sistemas.

A Tabela 3, adaptada de ABS (2003), apresenta um exemplo contendo os resultados de um Hazop.

Tabela 3 – Resultados obtidos em um Hazop (Adaptado de ABS, 2003)

Hazop para o sistema de compressão de ar a bordo da embarcação						
Item	Desvio	Causas	Consequências	Mitigação	Avaliação do risco	Recomendações
1. Entrada de ar para o compressor						
1.1	Fluxo alto	-	Nenhum acidente de interesse	-	-	-
1.2	Fluxo baixo/nenhum fluxo	Obstrução do filtro ou tubulação de entrada de ar. Acúmulo de água de chuva na tubulação de entrada e potencial congelamento	Operação ineficiente do compressor, causando uso excessivo de energia e possível dano ao compressor. Baixo ou nenhum fluxo de ar para os equipamentos, causando ineficiência na produção e possíveis interrupções.	Instalação de válvula de alívio entre o compressor e o filtro. Substituição periódica do filtro. Instalação de tela e cobertura na entrada de ar.	Risco médio (consequência média, frequência média)	Incluir verificação de pressão como parte do procedimento diário da equipe de manutenção ou substituição do indicador local e instalação de alarme de baixa pressão
1.3	Fluxo na direção errada	Nenhuma causa potencial identificada	-	-	-	-
...	...	...	...	...	...	...

3.2.4 Análise de Modos de Falha e Efeitos

Uma Análise de Modos de Falha e Efeitos (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis* – FMEA) tem como objetivo a identificação de possíveis modos de falha de cada componente de um sistema, assim como suas causas e consequências no sistema e em outros componentes. Essa técnica, conforme descreve Schleder (2012), permite a identificação de áreas potenciais de falhas e fornece documentação detalhada de como a falha do sistema pode ocorrer, sendo uma eficiente ferramenta para uma análise qualitativa.

O propósito de uma FMEA, conforme citado em U. S. MIL-STD-1629A (1980), é estudar os efeitos da falha de um item na operação de um sistema e classificar cada potencial falha de acordo com a sua severidade.

Porém, conforme relatam Modarres, Kaminskiy e Krivtsov (1999), o fato de detalhar uma falha de cada vez pode ser considerado uma limitação da FMEA, já que ela não é adequada para analisar sistemas com múltiplos modos de falhas.

A USNRC (1983) cita que vários passos são importantes para se realizar uma FMEA. O sistema a ser analisado, incluindo sua função e operação, deve ser definido, bem como suas interfaces. As categorias de falhas e condições ambientais devem ser especificadas. A extensão de cada um desses passos depende da complexidade do sistema.

A tabela de resultados de uma FMEA deve conter essencialmente em suas colunas as informações a seguir: (Martins e Natacci, 2008)

- Identificação do componente: esta coluna deve conter um número de identificação do componente e permitir a sua identificação em documentos de referência, tais como diagramas de instrumentação e de processo;
- Descrição do componente: esta coluna deve detalhar o tipo de componente e suas características básicas;
- Função: esta coluna deve detalhar todas as funções do componente no sistema analisado;
- Modos de falha: esta coluna deve detalhar todos os possíveis modos de falha para o componente;
- Causa da falha: esta coluna deve indicar todas as possíveis causas para cada modo de falha identificado;

- Efeitos: esta coluna deve descrever os efeitos de cada modo de falha para o sistema;
- Detecção: esta coluna deve identificar todos os métodos de detecção de cada modo de falha específico, se houver;
- Medidas mitigadoras: esta coluna deve identificar todas as possíveis medidas mitigadoras para cada modo de falha, se houver; e
- Observações: esta coluna contém todas as observações relevantes identificadas pelo analista.

3.3 Probabilidades de ocorrência

Nesta seção serão apresentados conceitos gerais sobre o cálculo da probabilidade de ocorrência de cenários acidentais.

A seção está dividida em quatro partes, sendo uma de conceitos gerais e três de técnicas de análise, respectivamente, árvore de falhas, árvore de eventos e redes bayesianas.

3.3.1 Conceitos gerais

Alguns conceitos gerais de probabilidade úteis para o bom entendimento da sequência do trabalho serão apresentados nas seções seguintes, 3.3.1.1 e 3.3.1.2.

3.3.1.1 Axiomas da probabilidade

Conforme apresentado por Martins (2013), a probabilidade possui três axiomas, que aqui serão apresentados para o melhor entendimento de conceitos a serem discutidos nos itens seguintes.

Axioma 1: A probabilidade de um evento E é um número não-negativo.

Axioma 2: A probabilidade de um evento certo é igual a 1.

Axioma 3: Dados dois eventos E e F , mutuamente excludentes, a probabilidade de ocorrer um deles é a soma das probabilidades de cada um:

$$P(E \cup F) = P(E) + P(F) \quad (2)$$

Dois eventos E e F são mutuamente excludentes caso não possam ocorrer simultaneamente como resultado do mesmo experimento, ou seja, a interseção entre os eventos é vazia.

3.3.1.2 Probabilidade condicional e independência

Sendo a probabilidade do evento A dado que o evento B ocorreu denotada por $P(A|B)$, uma definição possível de se extrair da definição de probabilidade condicional é a chamada “regra do produto”, apresentada na Eq. (3), conforme mostra Maturana (2010).

$$P(A, B) = P(A|B)P(B) \quad (3)$$

Conforme mostrado por Martins (2013), nessa equação $P(A, B)$ representa a probabilidade de ocorrência simultânea dos eventos A e B .

Caso os eventos A e B sejam independentes, $P(A, B) = P(A)P(B)$, uma vez que nesse caso $P(A|B) = P(A)$. Essa igualdade, como apresentado por Maturana (2010), é utilizada nos portões “E” de uma árvore de falhas.

Outra relação que se extrai da relação de probabilidade condicional é a Eq. (4), conhecida como Teorema de Bayes:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A)P(A)}{P(B)} \quad (4)$$

O Teorema de Bayes, conforme relata Martins (2013), tem fundamental importância para a inferência da probabilidade dos nós em uma rede bayesiana a partir da verificação de uma evidência.

3.3.2 Árvore de falhas

Uma árvore de falhas é uma representação gráfica de um sistema que, conforme USNRC (1981), pode ser descrita como uma técnica por meio da qual um estado indesejado de um sistema é especificado e o sistema é então analisado no contexto de seu ambiente e de sua operação para se encontrar todos os cenários nos quais o evento indesejado pode ocorrer.

Assim, a árvore de falhas permite identificar as causas básicas de acidentes e de falhas de um determinado sistema, além de possibilitar a estimativa da frequência com que determinada falha pode ocorrer.

Em uma árvore de falhas, conforme citam Kumamoto e Henley (1996), um evento indesejado aparece como evento-topo da árvore, e este evento é ligado a eventos de falha mais básicos através de eventos intermediários e portões lógicos.

Uma árvore de falhas não necessariamente contém todos os modos de falha de todos os componentes do sistema; conforme relatam Modarres, Kaminskiy e Krivtsov (1999); somente os modos de falha que contribuem significativamente para a ocorrência do evento-topo de interesse são modelados. Os autores também citam que a árvore de falhas em si é uma representação gráfica de várias combinações de falhas que levam à ocorrência de um evento-topo.

Na construção de uma árvore de falhas, diversos símbolos são utilizados, conforme é apresentado por Modarres, Kaminskiy e Krivtsov (1999). Alguns dos mais comumente utilizados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Símbolos para a representação de eventos em uma árvore de falhas		
Evento	Símbolo	Descrição
Evento básico		Um evento básico não requer desenvolvimento adicional
Evento intermediário		Evento que ocorre devido a uma ou mais causas antecedentes que agem através de portões lógicos
Evento não desenvolvido		Evento que não é desenvolvido devido a informações insuficientes ou indisponíveis

Como principais portões lógicos para a elaboração de uma árvore de falhas têm-se, conforme apresentado por Schleder (2012), os portões “E” e “OU”. O portão “E” é utilizado para representar o caso em que a saída ocorre apenas se todos os eventos de entrada ocorrerem simultaneamente. Já o portão “OU” é utilizado para representar que pelo menos um dos eventos de entrada deve ocorrer para que o evento de saída ocorra. A simbologia para os portões descritos é apresentada na Tabela 5. Vale ressaltar que diversos outros portões podem ser utilizados, conforme apresentado por USNRC (1981) e Modarres, Kaminskiy e Krivtsov (1999).

Tabela 5 – Portões lógicos para uma árvore de falhas		
Portão	Símbolo	Descrição
E		Evento de saída ocorre se todos os eventos de entrada ocorrerem
OU		Evento de saída ocorre se pelo menos um evento de entrada ocorrer

A árvore de falhas é uma técnica útil para se analisar um sistema tanto qualitativa quanto quantitativamente.

Em uma análise qualitativa, o objetivo da árvore de falhas é a identificação dos cenários que podem levar ao evento de interesse, ou, em outras palavras, à identificação das relações entre causa e efeito dos possíveis estados dos eventos básicos e o evento-topo. Assim, uma árvore de falhas é útil para mostrar qual o conjunto de eventos básicos que pode ocasionar a ocorrência do evento de interesse. Isso é possível através da identificação dos conjuntos de corte (*cut-sets*), que representam as combinações de eventos básicos em uma árvore de falhas que, no caso de sua ocorrência simultânea, levam à ocorrência do evento-topo. Em uma análise qualitativa, são utilizados os conjuntos mínimos de corte, que são os *cut-sets* que apresentam a menor combinação possível de eventos básicos que levariam à ocorrência do evento-topo. Assim, a técnica de árvore de falhas também é importante numa análise qualitativa, pois é possível se identificar quais os eventos básicos mais relevantes, que são aqueles que compõem os conjuntos de corte de menor ordem.

Já em uma análise quantitativa, o objetivo é a determinação da probabilidade de ocorrência de cada cenário. Dessa forma, a árvore de falhas pode ser utilizada conhecendo-se as probabilidades de ocorrência dos eventos básicos que levam à ocorrência do evento-topo, de forma a se calcular, baseado nessas probabilidades, a probabilidade de ocorrência do evento-topo.

Como forma de se realizar a análise de uma árvore de falhas, esta pode ser reduzida, utilizando-se álgebra booleana, de forma a identificar quais são as possíveis combinações de eventos básicos suficientes para se atingir o evento-topo. Assim, conforme mostra Schleder (2012), uma vez definidos os *cut-sets* mínimos da árvore, as probabilidades de ocorrência dos eventos básicos são usadas para o cálculo das probabilidades de ocorrência do evento-topo.

Porém, é importante ressaltar que, conforme apresentado por Bobbio et al. (2001), a análise por árvore de falhas tem algumas limitações. Entre as principais está o fato de a técnica considerar os eventos básicos como estatisticamente independentes. Além disso, existe a limitação de considerar eventos apenas com estados binários (falha/não-falha), não considerando possíveis estados intermediários destes. Outra importante limitação da técnica é a impossibilidade de se considerar a sequência cronológica dos eventos, sendo consideradas apenas suas ocorrências ou não.

Além destas, existe também a limitação da impossibilidade da avaliação diagnóstica baseada na constatação de evidências, ou seja, com a árvore de falhas é possível se avaliar a causa e o efeito, porém não o contrário, onde a partir da evidência de ocorrência de um determinado efeito se determinariam as causas mais prováveis.

3.3.3 Árvore de eventos

Árvores de eventos são definidas pela IMO (2002) como um diagrama lógico usado para analisar os efeitos de um acidente, uma falha ou um evento indesejado.

Árvores de eventos podem ser usadas para, conforme indica ABS (2003), analisar quase qualquer sequência de eventos, mas são mais eficientes para mostrar possíveis resultados de eventos iniciadores para os quais vários recursos de defesa estão em linha como proteção.

Um exemplo da estrutura de uma árvore de eventos é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Exemplo da estrutura de uma árvore de eventos

Nessa estrutura, o evento inicial é localizado na coluna à esquerda, sendo que a ordem das colunas deve seguir a sequência cronológica dos eventos. Assim, ao final da árvore são identificados os possíveis estados finais do sistema (cenários) e o conjunto de eventos que levaram a tal estado.

Uma árvore de eventos, tal qual a árvore de falhas, pode ser usada tanto para uma análise qualitativa quanto quantitativa de um determinado sistema. Qualitativamente ela apresenta as possíveis combinações de eventos que levariam a um cenário de falha do sistema. Já quantitativamente ela colabora na obtenção da frequência de ocorrência de cada possível cenário, considerando-se a probabilidade de ocorrência de cada evento intermediário.

Diferentemente da árvore de falhas, a árvore de eventos agrega a possibilidade de analisar uma sequência de eventos considerando suas ocorrências cronologicamente (embora não seja limitada a esses casos).

Por outro lado, ainda existe a limitação de que o estado de cada evento seja discreto – porém não necessariamente booleanos, permitindo a consideração de estados intermediários.

3.3.4 Redes Bayesianas

A técnica de análise de redes bayesianas é relativamente recente, tendo sido desenvolvida já no final do século passado, passando a ser utilizada em diversas áreas, como inteligência artificial, medicina e engenharia, entre outras, como pode

ser observado em Song, Lee e Park (2011), Haddad, Himes e Campbell (2013), e Deublein et al. (2012).

Schleder, Martins e Souza (2011) citam que, por definição, as redes bayesianas são grafos acíclicos diretos, onde os nós representam variáveis aleatórias e os arcos representam dependências condicionais, e afirmam que tais redes são poderosos modelos probabilísticos para a construção de relações causais entre eventos e para modelar os efeitos dos modos de falha de um sistema.

Em uma rede bayesiana, os nós sem nenhum arco direcionado para ele são chamados nós raízes e tem uma tabela (nós discretos) ou função (nós contínuos) de probabilidade associadas a eles. Os nós que possuem arcos direcionados para eles são chamados nós filhos, enquanto que aqueles que possuem nós direcionados a partir deles são chamados nós pais (Mahadevan, Zhang e Smith, 2001).

Langseth e Portinale (2005) relatam que as redes bayesianas têm sido frequentemente comparadas com outras técnicas de análise de confiabilidade, e isso tem mostrado que elas possuem significativas vantagens sobre as técnicas tradicionais. Entre as principais, se destacam o fato de as redes bayesianas aceitarem diversos possíveis estados ou mesmo variáveis contínuas para seus nós, permitirem a consideração da dependência entre componentes e a atualização das informações disponível a partir da consideração de evidências. Tais fatores fazem com que essa técnica tenha sido mais explorada nos últimos tempos em detrimento da árvore de falhas e da árvore de eventos.

Nas seções subsequentes serão apresentadas as relações de dependências entre os nós de uma rede bayesiana através do conceito de conjunção de probabilidades e das características do grafo e, posteriormente, as possíveis inferências (exata e aproximada) que podem ser obtidas a partir de uma rede bayesiana.

3.3.4.1 Conjunção de Probabilidades

A conjunção de probabilidades, conforme relata Martins (2013), representa a probabilidade de ocorrência de cada combinação dos possíveis estados de cada variável analisada. Assim, se houver, por exemplo, duas variáveis independentes entre si, A e B , com probabilidades $P(A)=\langle 0,3; 0,3; 0,4 \rangle$ e $P(B)=\langle 0,2; 0,2; 0,5; 0,1 \rangle$, sendo que cada valor representa a probabilidade de um dos possíveis estados das

variáveis, a conjunção de probabilidades $P(A,B)$ terá 12 possíveis valores, conforme mostrado na Tabela 6.

Tabela 6 – Conjunção de Probabilidades das variáveis A e B				
	b_1	b_2	b_3	b_4
a_1	0,06	0,06	0,15	0,03
a_2	0,06	0,06	0,15	0,03
a_3	0,08	0,08	0,20	0,04

No caso de probabilidades discretas, as combinações de valores de um conjunto de variáveis aleatórias são apresentadas no que usualmente se chama de TPC (tabela de probabilidades condicionais).

É importante ressaltar, como colocado por Maturana (2010) e Martins (2013), que um problema com um grande número de variáveis e/ou grande número de estados das variáveis terá um número ainda maior de combinações de estados. Além disso, preencher as TPC será tão mais difícil quanto maior for a quantidade de probabilidades necessárias para isso.

3.3.4.2 Características do grafo

Partindo-se da estrutura de um grafo, é possível se determinar a existência e as condições de dependência entre as variáveis de um domínio (Martins, 2013).

Sendo assim, as relações de independência podem ser identificadas através de três diferentes conceitos, conforme relata Schleder (2012): condição de Markov, cobertor de Markov e d-separação.

A condição de Markov estabelece que um nó é condicionalmente independente de todos os nós que não são seus descendentes, dado o estado de seus nós pais. Tal condição é exemplificada na Figura 2, onde o nó D é condicionalmente independente dos nós E, C e G, dado o estado dos seus nós pais A e B.

Figura 2 – Exemplo de condição de Markov

Já o conceito de cobertor de Markov, conforme descrito em Schleder (2012), é mais amplo que o anterior, uma vez que permite a visualização da independência condicional de um nó em relação aos demais nós do grafo, dado o estado dos seus pais, dos seus filhos, e dos pais de seus filhos. Para um melhor entendimento desse conceito é apresentada a Figura 3, retirada de Maturana (2010), na qual a área interna à linha pontilhada delimita o conjunto de nós que compõe o cobertor de Markov para o nó A destacado.

Figura 3 – Exemplo de cobertor de Markov (Maturana, 2010)

Outra maneira de verificar a dependência condicional entre dois nós é através do conceito de d-separação. Assim, conforme Maturana (2010), dois nós A e B, como apresentados na Figura 4, adaptada de Maturana (2010), são considerados d-separados e, portanto, condicionalmente independentes, se houver entre eles uma

das três condições apresentadas, ou seja, se houver um bloqueio entre eles. Tal bloqueio se dá pela existência de um nó C pertencente a uma evidência E apresentando um arco de entrada e um de saída entre A e B, ou dois arcos de saída, ou ainda se houver um nó D possuindo dois arcos de chegada entre os nós A e B.

Figura 4 – Exemplos de d-separação (Adaptado de Maturana, 2010)

3.3.4.3 Inferência

Conforme mostra Martins (2013), a possibilidade da realização de inferências dado o conhecimento da ocorrência de algum evento faz com que as redes bayesianas possam ser utilizadas para a realização das seguintes análises:

- Causa-efeito, obtendo probabilidades dos efeitos de um evento tido como evidência;
- Diagnóstico, obtendo as probabilidades associadas às possíveis causas de um evento dado como evidência;
- Intercausal, obtendo probabilidades de ocorrência de outra causa de um mesmo evento, dada a evidência de uma causa.

Essas possibilidades foram ilustradas, para melhor entendimento, na Figura 5, adaptada de Maturana (2010).

Figura 5 – Tipos de análises de inferência (Adaptada de Maturana, 2010)

Para a solução das redes bayesianas são encontrados algoritmos com solução exata e outros com solução aproximada, conforme mostra Maturana (2010). A seguir, serão apresentadas as características principais de cada tipo de solução.

3.3.4.3.1 Inferência exata

Schleder (2012) apresenta em seu trabalho uma descrição do processo utilizado para a inferência exata em redes bayesianas. Essa descrição é apresentada resumidamente a seguir.

Pelo segundo axioma da probabilidade, temos que:

$$P(\bar{a}) = 1 - P(a) \quad (5)$$

onde $P(\bar{a})$ é a probabilidade de a ser falso.

Esta equação pode ser estendida para o caso geral, sendo D uma variável discreta de domínio $[d_1, \dots, d_n]$, então pode-se dizer que qualquer distribuição de probabilidade sobre uma única variável deve somar 1. Assim:

$$\sum_{i=1}^n P(D = d_i) = 1 \quad (6)$$

Vale também dizer que qualquer distribuição de probabilidade conjunta sobre qualquer conjunto de variáveis deve somar 1. Assim, do terceiro axioma da probabilidade tem-se que a probabilidade de A é igual à soma de seus estados:

$$P(A) = \sum_{i=1}^n P(e_i) \quad (7)$$

A probabilidade condicional de uma variável de interesse é dada pelo somatório de termos da distribuição total conjunta, ou seja, para uma variável de interesse X, dada uma evidência e e sendo y o conjunto das variáveis constantes não observadas, temos:

$$P(X|e) = \frac{1}{P(e)} \sum_y P(X, e, y) \quad (8)$$

Assim, as redes bayesianas calculam a probabilidade condicional conjunta de uma variável através da somatória dos produtos de probabilidades condicionais da rede. Este processo, apesar de poder ser aplicado a qualquer rede, torna-se tão mais complexo quanto maior a complexidade da rede. Algumas técnicas foram desenvolvidas para se tentar simplificar esse cálculo, como a eliminação de variáveis e o agrupamento de variáveis, apresentados em Maturana (2010).

Ainda assim, em determinados casos, a utilização de inferência aproximada, descrita na seção a seguir, pode se apresentar como a mais viável.

3.3.4.3.2 Inferência aproximada

Quando uma rede bayesiana tem seu tratamento dificultado devido à sua complexidade, métodos aproximados que utilizam simulação estocástica passam a ser adotados para se obter uma estimativa das probabilidades conjuntas, conforme mostram Martins (2013), Maturana (2010) e Schleder (2012).

Assim, através dessa simulação, são gerados dados aleatórios que são trabalhados estatisticamente e fornecem uma aproximação para uma determinada condição desejada, conforme Maturana (2010).

Conforme relata Martins (2013), métodos para inferência aproximada utilizam simulação estocástica, gerando resultados a partir da definição dos estados dos nós raízes aleatoriamente.

Em seu trabalho, Maturana (2010) apresenta um exemplo de procedimento de cálculo por inferência aproximada.

3.4 Análise de consequências

Nesta seção são listados os principais modelos matemáticos disponíveis na literatura para a quantificação das consequências de uma eventual liberação de materiais perigosos, sejam eles tóxicos, inflamáveis e/ou explosivos.

É importante ressaltar que este trabalho não tem a intenção de detalhar os modelos matemáticos, mas sim de apresentá-los destacando suas principais restrições, características e possíveis utilizações.

3.4.1 Modelos de formação, dispersão e evaporação de poça

No caso de ocorrer uma liberação acidental de um produto em estado líquido, haverá, possivelmente, a formação de uma poça de líquido, além de eventual nuvem de vapor, que poderá ter a própria poça contribuindo para a sua formação.

A seguir são apresentados os modelos GASP e PVAP, que simulam a formação e dispersão de poça sobre o solo ou sobre água, além de sua evaporação.

3.4.1.1 Modelo GASP (*Gas accumulation over spreading pools*)

O modelo GASP, proposto por Webber em 1990 e descrito em TNO (2005), é aplicável a poças formadas por qualquer líquido, tanto sobre o solo quanto sobre a água, além de considerar a vaporização do material tanto em função da transferência de massa proporcionada pelas condições ambientais quanto pela troca de calor com o ambiente.

Martins (2013) também informa que caso a poça seja formada sobre o solo, é considerada a sua rugosidade, e no caso de formação sobre a água, é considerado que ela flutua e não ocorre dissolução. Além disso, o modelo GASP permite a

modelagem tanto para poças formadas em vazamentos instantâneos, quanto em vazamentos contínuos, e considera possíveis confinamentos. É importante ressaltar que, em todos os casos, a poça é considerada circular, plana, horizontal e com superfície uniforme.

O modelo GASP é composto basicamente por seis equações diferenciais que modelam, em função do tempo, o volume de líquido liberado sobre a poça, o volume de líquido vaporizado a partir da poça, o volume de líquido na poça, a velocidade radial da dispersão da poça, o raio e a temperatura da poça.

Para um maior detalhamento a respeito da modelagem matemática proposta, recomenda-se consulta a TNO (2005).

3.4.1.2 Modelo PVAP (*Pool vaporization*)

O modelo PVAP é o modelo utilizado pela empresa DNV-GL em seu software comercial *Phast Risk*. Conforme apresentado por Martins (2013), o modelo PVAP simula a formação e dispersão de poça formada sobre água ou solo e estima o fluxo de vapor originado a partir de sua superfície. A vaporização é contabilizada enquanto a poça se dispersa utilizando diferentes sub-modelos para o caso de formação sobre solo ou água, sendo que no caso de formação sobre o solo considera o fluxo de calor trocado com o solo, a convecção pelo ar, a radiação e a difusão de vapor, enquanto no caso de formação sobre a água considera também a dissolução do líquido da poça.

Martins (2013) também relata que para o modelo PVAP a temperatura da poça é inicialmente adotada como sendo igual à do líquido vazado, e que este também considera a formação da poça concêntrica ao ponto de liberação, mas diferente do modelo GASP, considera uma espessura mínima, o que limita a sua dispersão.

O modelo simula a dispersão da poça formada por liberações de líquido instantâneas, contínuas ou de duração finita e com fluxo variável no tempo, até que a poça encontre uma barreira ou atinja a espessura mínima.

O modelo PVAP é constituído por equações diferenciais que modelam o comportamento, em função do tempo, da massa de líquido na poça, do raio da poça formada, da temperatura da poça, da taxa de evaporação da poça e do calor perdido pela evaporação da poça.

Para um maior detalhamento a respeito da modelagem matemática, recomenda-se a consulta a Witlox (2006).

3.4.2 Modelos de dispersão de nuvem

Como relata Martins (2013), modelos de dispersão têm como objetivo prever a evolução e as características de uma nuvem de vapor ou gás.

Os modelos disponíveis na literatura se dividem, basicamente, em dois grupos, conforme mostra Martins (2013): dispersão de nuvem mais densa que o ar atmosférico e dispersão de nuvem com densidade igual ou inferior à do ar atmosférico. As duas subseções seguintes, 3.4.2.1 e 3.4.2.2, têm como foco cada um destes grupos. A subseção 3.4.2.3 descreve o modelo *Unified Dispersion Model* (UDM), enquanto a subseção 3.4.2.4 trata dos modelos de fluidodinâmica computacional (CFD), ambos utilizados tanto para nuvens densas quanto para nuvens passivas.

3.4.2.1 Modelos para dispersão de nuvem densa

No caso do material liberado possuir densidade superior à do ar atmosférico, a dispersão ocorrerá, num primeiro estágio, na forma de uma nuvem densa, com a nuvem fazendo um movimento descendente até tocar o solo, e com as condições atmosféricas tendo sua influência, em geral, desconsiderada pelos modelos matemáticos empíricos.

A seguir são apresentados o modelo de Britter e McQuaid, o modelo SLAB, o modelo de Hoot, Meroney e Peterka e o modelo de Chen e Rodi, que são alguns dos modelos matemáticos disponíveis na literatura que tratam de nuvens densas.

Modelo Britter e McQuaid

Conforme Martins (2013), o modelo proposto por Britter e McQuaid tem por objetivo estimar os níveis de concentração média em função da distância percorrida pela nuvem, para o caso de uma liberação instantânea, ou a máxima concentração da nuvem ao longo de seu rastro, no caso de uma liberação contínua.

O modelo consiste em um conjunto de relações empíricas entre as variáveis independentes que determinam o processo de dispersão de uma nuvem densa, e pode ser aplicado para uma liberação instantânea, de duração finita ou contínua, porém sem a presença de jato.

Vale ressaltar que, conforme cita Martins (2013), esse modelo é de fácil aplicação, e contou com resultados de experimentos realizados em laboratório e em escala real, além de ensaios em túnel de vento, para a obtenção das correlações.

Para mais detalhes sobre o modelo recomenda-se a consulta a Britter e McQuaid (1988).

Modelo SLAB

O modelo SLAB, é um modelo integral e considera o efeito gravitacional e a entrada de ar na nuvem, com consequentes alterações de temperatura e densidade, e também com possível condensação de vapor de água devido à umidade presente no ar.

O modelo SLAB pode ser utilizado para modelar o comportamento de nuvens geradas a partir de liberações instantâneas, contínuas ou de duração finita, na altura do solo, elevadas ou em jatos horizontais ou verticais.

Porém, como relata Martins (2013), como o modelo não equaciona o efeito de vento transversal ao jato, no caso de uma nuvem gerada por jato vertical o SLAB utiliza-se do modelo de Hoot, Meroney e Peterka (descrito a seguir) para a determinação da altura máxima do jato no caso de liberação por jato vertical em atmosfera não quiescente.

O modelo SLAB foi originalmente elaborado para a análise de dispersão de nuvens densas, mas também é capaz de modelar a transição de uma nuvem densa para passiva e até mesmo a dispersão de uma nuvem que já se inicia mais leve que o ar, conforme relata Martins (2013).

Para uma descrição detalhada do equacionamento do modelo, recomenda-se TNO (2005).

Modelo Hoot, Meroney e Peterka

O modelo, proposto por Hoot, Meroney e Peterka em 1973, avalia a dispersão de nuvens densas resultantes de liberações contínuas de jatos verticais submetidos a vento lateral, conforme relata Martins (2013). Quando liberada por jato vertical, a nuvem densa atingirá uma altura máxima e retornará ao nível do solo pela ação gravitacional.

O processo de dispersão apresenta três fases distintas, representadas na Figura 6, adaptada de TNO (2005), que são: elevação, retorno ao solo e dispersão de nuvem densa.

Figura 6 – Dispersão de nuvem densa formada devido a jato vertical e com ação de vento lateral (Adaptada de TNO, 2005)

Conforme relata Martins (2013), o modelo apresenta um tratamento integral, mas não modela a entrada de ar na nuvem e assume velocidade lateral constante, o que limita sua aplicação a uma região próxima à fonte de liberação.

Para uma descrição detalhada do equacionamento da modelagem recomenda-se TNO (2005).

Modelo Chen e Rodi

O modelo de Chen e Rodi, conforme apresenta Martins (2013), é um modelo empírico que pode ser aplicado para a avaliação da dispersão de nuvem formada por liberações contínuas com a presença de jatos verticais em atmosfera quiescente, independente da densidade do componente químico que a compõe.

Considera-se que a condição da atmosfera quiescente pode ser relaxada se a velocidade do centro do jato for muito superior à velocidade do vento. Outra consideração é que o modelo pode ser aplicado independente da direção do jato desde que a substância tenha densidade igual à do ar ambiente.

Para aprofundamento no conhecimento do modelo, recomenda-se TNO (2005).

3.4.2.2 Modelos de dispersão de nuvem passiva

A dispersão de nuvem passiva é afetada principalmente pelas condições atmosféricas (em caso de liberação sem jato), diferentemente da nuvem densa, onde o fluxo interno é quem comanda a dinâmica da dispersão.

A seguir são apresentados os modelos GPM, Chen e Rodi e Briggs, alguns dos disponíveis na literatura para a modelagem de nuvens passivas.

Modelo *Gaussian Plume Model* (GPM)

O modelo *Gaussian Plume Model* (GPM), descrito por TNO (2005), é aplicável à dispersão de nuvens passivas sobre solo plano e uniforme, além de condição atmosférica estacionária, conforme relata Martins (2013). Este modelo é utilizado para modelar liberações instantâneas ou contínuas sem a presença de jato.

Como não é capaz de considerar variações comumente percebidas na condição ambiental durante o dia, este modelo não é recomendado para a avaliação da dispersão de uma nuvem por um período superior a três horas.

Outra consideração do modelo é que o termo fonte apresenta dimensão desprezível e, caso isso não seja verdade, há a necessidade de serem acrescentados termos adicionais às expressões para a consideração das dimensões da fonte.

Para maior detalhamento do modelo recomenda-se TNO (2005).

Modelo Chen e Rodi

O modelo proposto por Chen e Rodi, apresentado na seção anterior, pode também ser adotado para casos em que a densidade da nuvem seja igual ou inferior à do ar ambiente.

Modelo Briggs

O modelo proposto por Briggs, conforme descreve Martins (2013), pode ser utilizado para avaliar a dispersão de uma nuvem com densidade igual ou inferior à do ar atmosférico, proveniente de liberação contínua submetida a vento lateral e tendo seu componente sido liberado na forma de jato vertical ou passivamente.

Baseando-se em resultados empíricos, este modelo descreve a trajetória da nuvem estimando a sua elevação em função da distância na direção do vento em relação ao ponto de liberação.

Para mais detalhes do modelo, recomenda-se a consulta a TNO (2005).

3.4.2.3 *Unified Dispersion Model (UDM)*

O modelo UDM é um modelo integral capaz de simular, conforme relata Martins (2013), a dispersão de nuvem densa ou passiva resultante de liberação instantânea, contínua ou de duração finita, constante ou variável no tempo, na altura do solo ou elevada, com a ocorrência ou não de jatos em qualquer direção. No caso de uma liberação de nuvem com duas fases (líquido e vapor), o modelo equaciona o fenômeno de vaporização da parte líquida do componente presente na nuvem antes do seu depósito no solo, considerando a porção vaporizada como incorporada à nuvem gerada.

Martins (2013) também coloca que para a modelagem de formação, espalhamento e vaporização de poça, o modelo UDM incorpora o modelo PVAP, e o vapor gerado pela poça é adicionado à nuvem. A possibilidade de variação de velocidade do vento, pressão e temperatura de acordo com a altura em relação ao solo é outra capacidade do modelo UDM, além deste possibilitar a simulação do processo de

transição de uma nuvem densa para uma nuvem passiva, deixando de ser necessário o acoplamento de diferentes modelos para cada fase da dispersão.

A desvantagem do modelo UDM é, conforme relatado por Martins (2013), o fato de tratar-se de um modelo proprietário e de apresentar aplicação complexa.

Para maior aprofundamento no modelo, recomenda-se Harper (2009).

3.4.2.4 Modelos de fluidodinâmica computacional (CFD)

Conforme apresenta Schleder (2015), os modelos físicos de dispersão são expressos na forma de equações integrais ou diferenciais parciais (mais comumente as equações de *Navier-Stokes* e *Euler*), sendo tais modelos implantados em ferramentas de fluidodinâmica computacional e, em geral, referidos apenas como modelos CFD.

Os resultados obtidos por modelos CFD são um conjunto de dados numéricos das propriedades do fluxo em pontos discretos do tempo e/ou espaço. A partir de tais dados, é possível se estimar características da nuvem dispersada.

Uma das principais vantagens dos modelos CFD, como cita Schleder (2015), está na possibilidade da consideração das características físicas do local no modelos, tais como obstáculos e declividade do terreno.

Porém, o principal problema relacionado à aplicação dos modelos CFD, como mostra CCPS (1999), está na necessidade de uma definição substancial das condições de contorno da simulação, incluindo dados climatológicos, de relevo, de estruturas próximas, entre outros, num espaço tridimensional.

3.4.3 Toxicidade

Com a concentração da nuvem de vapor no ar, é possível se calcular os efeitos tóxicos sobre as pessoas localizadas nas áreas atingidas pela pluma. Conforme apresenta CCPS (1999), existe grande dificuldade em se avaliar precisamente a resposta de um organismo humano a uma exposição tóxica aguda. Isso se deve a várias razões, que vão da ampla gama de efeitos sobre um corpo humano (irritação, asfixia, morte, entre outros) à variação da forma como cada organismo reage. Assim, para a determinação das consequências tóxicas de uma liberação, CCPS (1999)

mostra que uma possível abordagem a ser adotada é a consideração de um critério de dose tóxica, sendo esta a combinação da concentração do gás tóxico de interesse com a duração da exposição da pessoa afetada, de forma a se determinar um efeito à saúde.

Para a identificação da probabilidade de um determinado efeito, Finney (1979) propõe o método probit, que, conforme relata CCPS (1999), tem como objetivo a identificação do quão provável é a ocorrência de determinado efeito adverso à saúde (em geral, morte) após uma liberação de um material tóxico.

O método probit é apresentado na forma de uma equação do tipo:

$$Y = k_1 + k_2 \cdot \ln V \quad (9)$$

onde Y é o número probit, V representa a dose tóxica e k_1 e k_2 são constantes específicas da substância de interesse.

Assim, obtido o número probit, este pode ser convertido em uma probabilidade de fatalidade por uma relação direta tabelada, conforme mostra CCPS (1999).

Vale ressaltar que uma dificuldade encontrada no método probit é o fato de cada substância possuir seus parâmetros tóxicos específicos. Assim, pode-se encontrar esse tipo de dado em diferentes referências, porém no caso de a substância não ter sido adequadamente estudada, os parâmetros poderão apresentar valores não confiáveis.

3.4.4 Modelos de explosão/incêndio em nuvem

Martins (2013) relata que uma sequência acidental envolvendo liberação de uma substância inflamável, sem a ocorrência de ignição imediatamente após a liberação, poderá resultar em um incêndio em nuvem ou em explosão da nuvem.

Ainda que o produto liberado seja inflamável, o incêndio ou explosão ocorrerá apenas se a concentração da nuvem estiver entre os limites de inflamabilidade da substância que a compõe e houver contato com uma fonte de ignição, conforme relata Martins (2013). Além disso, para a ocorrência de explosão, é necessária a ocorrência de turbulência no material liberado, seja esta resultado da forma de liberação ou da presença de obstáculos na nuvem. No caso da amônia, substância

que será objeto de estudo deste trabalho, o limite superior de inflamabilidade é de 25%, enquanto o limite inferior de inflamabilidade é de 16%.

O mesmo autor mostra que, no caso de um incêndio, as consequências ficam limitadas à região interna da nuvem, enquanto que numa explosão as consequências podem se estender a grandes distâncias além da fronteira da nuvem, e que a diferença de uma situação para a outra depende basicamente da velocidade de propagação da chama e da existência ou não de confinamento.

Nas seções a seguir, são apresentados três modelos entre os disponíveis na literatura para a avaliação dos efeitos de explosão de uma nuvem. Os modelos de carga equivalente de TNT fazem a relação entre o poder explosivo da nuvem com uma carga de explosivos, enquanto os outros dois levam em conta o confinamento da nuvem e a velocidade de propagação da chama.

3.4.4.1 Modelos de carga equivalente de TNT

Conforme Martins (2013), esse tipo de modelo, totalmente empírico, associa a energia liberada na queima do material presente na nuvem com a energia liberada na explosão de uma massa equivalente de trinitrotolueno (TNT), considerando um coeficiente ou fator de equivalência. Assim, esses modelos reduzem o problema da modelagem de uma explosão de nuvem na determinação de um único coeficiente, o fator de equivalência, que, em geral, é estimado a partir da avaliação de ensaios experimentais ou de acidentes reais.

Para maior detalhamento, recomenda-se a consulta a TNO (2005).

3.4.4.2 Modelo *Multi-Energy*

Para a apresentação do modelo *Multi-Energy* é necessário o entendimento da diferenciação dos conceitos de detonação e deflagração. O primeiro se refere ao processo no qual a propagação da chama ocorre em função da compressão da substância a uma pressão que resulta em uma temperatura superior à temperatura de auto-ignição. Já o segundo é aquele no qual a propagação da chama resulta da condução de calor, podendo ocorrer tanto em regime laminar quanto turbulento.

O modelo *Multi-Energy* está fundamentado, conforme relata Martins (2013), na hipótese de que apenas é possível a ocorrência de uma deflagração na porção da nuvem que se encontra em repouso e em uma região obstruída ou parcialmente confinada.

Martins (2013) também coloca que o modelo é composto de uma família de curvas para a determinação do pico de sobrepressão, pressão dinâmica e tempo de duração da fase positiva da onda de sobrepressão em função da distância relativa entre o ponto de interesse e o centro da explosão. Essas curvas, obtidas a partir de simulações usando modelos de fluidodinâmica computacional (CFD), consideram a queima de uma nuvem de material inflamável em sua condição estequiométrica, com geometria semiesférica, com centro na altura do solo coincidente com o ponto de ignição.

Nesse modelo, os resultados são válidos para qualquer direção de propagação, devido à simetria da geometria considerada para a nuvem e o posicionamento do ponto de ignição.

Para um maior detalhamento, recomenda-se a consulta a TNO (2005).

3.4.4.3 Modelo *Baker-Strehlow*

De forma semelhante ao modelo *Multi-Energy*, o modelo *Baker-Strehlow* utiliza-se de simulações em CFD, conforme relata Martins (2013), para apresentar curvas para a estimativa da sobrepressão e, adicionalmente ao outro modelo, para o impulso gerado pela onda de sobrepressão.

Tais curvas consideram a queima de uma nuvem de material inflamável em sua condição estequiométrica, porém, diferentemente do modelo anteriormente apresentado, com uma geometria esférica e com centro coincidente ao ponto de ignição.

Em função dessa geometria, os resultados do modelo são válidos para qualquer direção de propagação, sendo considerado o pico de pressão constante na região interna à nuvem, decrescendo com o aumento da distância além da fronteira da nuvem. Este modelo não apresenta estimativa de pressão dinâmica ou de perfil de onda de sobrepressão, motivos pelos quais TNO (2005) recomenda a utilização do modelo *Multi-Energy* em detrimento a este.

Para um maior detalhamento, recomenda-se a consulta a TNO (2005).

3.4.5 Modelos de radiação térmica

Caso uma substância inflamável seja liberada na atmosfera e entre em contato com uma fonte de ignição, poderá ocorrer um incêndio. Neste caso, como relata Martins (2013), mesmo que não haja contato direto com a chama, a radiação térmica emitida pode provocar efeitos em objetos, sistemas ou pessoas.

Conforme mostrado em Martins (2013), existem três principais tipos de incêndios: incêndio em jato (que ocorre no caso de uma liberação na forma de jato), incêndio em poça (formado em uma poça de líquido inflamável) e bola de fogo (resultado de uma perda repentina de contenção de uma substância pressurizada). Modelos disponíveis na literatura para cada um desses três cenários são apresentados nas seções a seguir.

3.4.5.1 Modelos de incêndio em jato

Conforme relata Martins (2013), para a modelagem da geometria da chama e da radiação térmica de um incêndio em jato, TNO (2005) propõe o modelo apresentado por Chamberlain em 1987, o qual se trata de um modelo semi-empírico que considera a chama como um tronco de cone sólido e com poder emissivo uniforme. A aplicação deste modelo se restringe a jatos na vertical ou com inclinação de até 45° em relação à vertical, e formado apenas por vapor. O modelo é descrito pelo autor, conforme relata Martins (2013), com a seguinte itemização: estimativa da velocidade de descarga do jato; estimativa das dimensões da chama, considerando-a como um tronco de cone; cálculo do poder emissivo; determinação do fator de incidência e do fluxo de calor em função da distância.

Para situações diferentes das admitidas no modelo citado, Oke (2005) apresenta outros dois modelos, baseados no modelo Chamberlain (1987), sendo que o JSFH-Cook analisa incêndios em jato formados na liberação de líquidos ou de produtos multifásicos, enquanto que o JSFH-Johnson permite a análise de jatos horizontais ou com ângulo de inclinação superior a 45°.

Mais detalhes dos modelos são apresentados em Chamberlain (1987) e Oke (2005).

3.4.5.2 Modelos de incêndio em poça

Um parâmetro fundamental para o processo de emissão de radiação térmica, conforme apresentado em Martins (2013), é a taxa de queima, que é influenciada pela taxa de evaporação da poça e que, por sua vez, é influenciada pela presença de chama sobre a poça.

Os modelos empíricos que tratam de incêndio em poça são, em geral, divididos em modelos de fonte pontual e modelos de superfície emissora, sendo que em ambos os casos a chama é modelada como sendo cilíndrica, com diâmetro igual ao diâmetro da poça quando não há incidência de vento. Caso haja a presença de vento lateral, a chama é inclinada e a base é alongada, transformando-se numa elipse. Segundo TNO (2005), modelos de fonte pontual apresentam boas estimativas para o fluxo de calor emitido para distâncias superiores a cinco vezes o diâmetro da poça.

Uma combinação desses modelos empíricos é adotada no software comercial da empresa DNV-GL (*Phast Risk*), com o modelo POLF, descrito em Witlox (2005).

Para um maior detalhamento da modelagem recomenda-se a consulta a TNO (2005) e Witlox (2005).

3.4.5.3 Modelos de bola de fogo

Martins (2013) mostra que um incêndio do tipo bola de fogo pode ser resultante de um BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*), o qual ocorre em função da liberação instantânea de líquido inflamável pressurizado cuja temperatura de vaporização à pressão atmosférica é inferior à temperatura ambiente e, em geral, é decorrente de ruptura catastrófica de sua contenção. Assim, em tal liberação, o conteúdo é expelido sob a forma de uma mistura turbulenta de gás e líquido, que se expande rapidamente e se dispersa no ar na forma de nuvem, a qual, caso sofra ignição, gera o fenômeno da bola de fogo.

A bola de fogo é modelada como uma esfera emissora de radiação a partir da sua superfície, e usam-se relações empíricas para a estimativa dos seus parâmetros.

Os modelos mais comumente utilizados para o caso de uma bola de fogo são os propostos por TNO e pela *Health and Safety Executive* (HSE). A DNV propõe uma combinação destes modelos com o intuito de se garantir um maior conservadorismo. Conforme indicado por Oke (2004), o modelo proposto pela TNO, que é um modelo empírico, em geral apresenta um diâmetro maior, tempo de duração e altura do centro da bola de fogo, e menor poder emissivo da chama quando comparado com o modelo da HSE, também empírico.

Já o modelo DNV, conforme cita Martins (2013), estima o poder emissivo da chama conforme proposto pela HSE, e o raio da bola de fogo, sua altura e duração conforme proposto pela TNO, com a justificativa de garantir que os resultados apresentados sejam conservadores.

3.4.6 Modelos de BLEVE

O BLEVE (*Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) pode ser entendido como sendo resultante de uma perda repentina da contenção de um líquido armazenado pressurizado e com temperatura acima de sua temperatura de ebulição à pressão atmosférica, conforme cita Martins (2013). Essa perda de contenção pode ser devida a diversos fatores, mas comumente o BLEVE ocorre devido ao contato da superfície externa do reservatório com uma chama, a qual gera evaporação do líquido internamente e consequente aumento de pressão interna.

Para a modelagem dos efeitos da sobrepressão geradas por um BLEVE, em geral são utilizados, conforme cita Martins (2013), modelos com carga equivalente de TNT, apresentados na seção 3.4.4.1, ou o modelo proposto por Baker et al., apresentado a seguir.

3.4.6.1 Modelo Baker et al.

O modelo de Baker et al. propõe, conforme relata Martins (2013), um tratamento diferenciado para os campos distantes e próximos, além de uma correção para tanques cilíndricos em substituição aos esféricos e para o efeito do solo. O modelo não considera o efeito míssil (conversão de energia da explosão em energia cinética

de fragmentos), nem a possível direcionalidade dos efeitos em função da geometria do tanque.

Vale ressaltar que, em função das hipóteses assumidas, a TNO (2005) afirma que o modelo possui precisão limitada, especialmente para o campo próximo.

Para um maior detalhamento do modelo recomenda-se TNO (2005).

4 Metodologia

Para o presente estudo, propõe-se uma metodologia para a análise de riscos especificamente devido à utilização de amônia em uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio. Tal metodologia tem como proposta fazer uma combinação de técnicas entre as diversas apresentadas no Capítulo 3, de forma a se obter uma sequência prática e exequível da aplicação dessas técnicas.

Essa metodologia proposta será avaliada através de sua aplicação em um sistema real adaptado, processo que será apresentado no Capítulo 5.

A metodologia proposta é composta por seis etapas: familiarização com o sistema a ser analisado, identificação de perigos, estimativa da probabilidade de ocorrência de eventos acidentais, estimativa das consequências de tais eventos, cálculo do risco e avaliação dos resultados. Cada uma destas etapas, além das atividades necessárias para seus desenvolvimentos, é detalhada a seguir.

A Figura 7 apresenta uma representação gráfica da sequência de ações da metodologia proposta e suas interações.

Figura 7 – Sequência de ações da metodologia proposta

4.1 Familiarização

Na etapa de familiarização com o sistema a ser avaliado, o analista deve identificar e detalhar as principais características do sistema através de documentação técnica, tais como memoriais descritivos, fluxogramas de engenharia e de processo, entre outros, e de visitas à unidade, caso esta já esteja instalada, além do levantamento de características inerentes aos processos que se utilizam do sistema analisado. Dessa forma, objetiva-se conhecer o sistema suficientemente bem para que as análises a serem realizadas na sequência possam ocorrer de forma representativa e adequada ao sistema estudado.

4.2 Identificação de perigos

Nesta etapa, o analista deve realizar uma análise geral preliminar do sistema com o objetivo de identificar os possíveis perigos da instalação e selecionar qualitativamente os mais relevantes para a análise quantitativa. Entre as diversas técnicas apresentadas no item 3.2 desta dissertação, esta metodologia propõe que seja adotada a Análise Preliminar de Perigos (APP), uma vez que este passo visa uma visão geral dos perigos associados ao sistema. Tal técnica foi selecionada devido à fácil aplicação e conveniência para o foco desta metodologia.

Com a aplicação desta técnica, os perigos da instalação são levantados e ordenados, de forma a se poder identificar aqueles que devem ser priorizados. Assim, através de uma análise qualitativa do sistema, é possível se fazer a seleção dos eventos mais relevantes, que deverão ser avaliados quantitativamente nas etapas seguintes da análise.

4.3 Estimativa das probabilidades de ocorrência

Levantados os principais perigos da instalação, deve ser estimada a probabilidade de ocorrência de cada possível cenário accidental. Para isso propõe-se que seja utilizada a técnica das redes bayesianas. Essa técnica, apresentada no item 3.3.4, foi escolhida pelo fato de apresentar evoluções em relação às outras mais

tradicionais, de forma que representa de maneira mais realista e com vantagens o sistema a ser estudado. Entre as vantagens importantes para este trabalho, destacam-se o fato de poderem ser considerados diversos estados para cada componente, a dependência entre eventos e a possibilidade de atualização da rede utilizando-se evidências e a opinião de especialistas, que poderão ser utilizadas para convergir os dados de falha históricos (obtidos em bases de dados) para uma situação mais específica local.

Além dos resultados de probabilidades de ocorrência, as redes bayesianas podem ser analisadas de forma a se obter informações adicionais para a análise de riscos, conforme indicado na seção 3.3.4.3. Esta metodologia propõe também que as redes bayesianas sejam utilizadas nesse sentido, identificando-se informações relevantes para a análise e extraíndo-se estas das RB, tais como o diagnóstico dos causadores mais prováveis dos eventos de interesse, a relação causa-efeito de evidências e a identificação dos nós que apresentam maior sensibilidade na RB, entre outras.

4.4 Estimativa das consequências

Nesta etapa deve ser realizada a estimativa, através de modelagem matemática, das consequências de cada possível cenário considerado como representativo em termos de efeitos tóxicos, de incêndio e de explosão. Para a estimativa dessas possíveis consequências, a metodologia propõe a utilização dos modelos matemáticos listados a seguir.

4.4.1 Formação de poça

Para a avaliação da formação de possível poça do material liberado sob a forma de líquido, esta metodologia propõe a utilização do modelo PVAP, que é descrito no item 3.4.1.2 deste trabalho. Tal escolha se deve ao fato deste modelo atender às necessidades do cenário objeto de estudo, considerando as diversas possíveis formas de liberação da amônia, as interações da poça com o solo e o ar, sua vaporização e dispersão.

O modelo GASP apresentado em 3.4.1.1 também atende aos requisitos de interesse da modelagem do presente estudo, podendo ter sua utilização considerada

adequada. A proposição de utilização do modelo PVAP se deu pela facilidade de sua utilização de maneira integrada aos outros modelos selecionados através do software *Phast Risk* (DNV-GL, 2010).

4.4.2 Dispersão de nuvem

Para a dispersão da nuvem de vapor do material, esta metodologia sugere a utilização do modelo *Unified Dispersion Model* (UDM). Este modelo foi selecionado pelo fato de modelar tanto a dispersão de nuvens densas quanto de nuvens passivas, processo que atende à dinâmica da liberação de amônia quando pressurizada, conforme estudado neste trabalho, além de ser adequado à modelagem sob qualquer forma de liberação ou condição atmosférica. Este modelo é descrito no item 3.4.2.3 desta dissertação.

4.4.3 Toxicidade

Para a avaliação dos efeitos tóxicos relacionados à dispersão da amônia esta metodologia indica a utilização do método probit com os parâmetros específicos da amônia com foco na consequência fatalidade da pessoa exposta. Assim, é possível se realizar a correlação entre a concentração de amônia no ar e a probabilidade de fatalidade de uma pessoa exposta à passagem da nuvem.

4.4.4 Sobrepressão

Para a avaliação dos efeitos de sobrepressão causados por uma possível explosão de nuvem, o modelo que se recomenda, entre aqueles apresentados na seção 3.4.4, é o *Multi-Energy*, modelo de maior refinamento em relação ao modelo de carga equivalente de TNT, e que tem sua utilização recomendada em relação ao modelo *Baker-Strehlow*, conforme citado em suas descrições.

Caso a sobrepressão seja advinda de um BLEVE, o modelo cuja utilização se sugere é o desenvolvido por Baker et al., apresentado na seção 3.4.6.1, que possui maior refinamento em relação aos modelos de carga equivalente de TNT.

4.4.5 Radiação térmica

Para a modelagem dos efeitos de radiação térmica, vários modelos matemáticos são necessários, dependendo da origem da emissão da radiação.

Para a radiação emitida por um incêndio na forma de jato, o modelo a ser utilizado na presente metodologia é o apresentado por Chamberlain (1987), descrito neste trabalho no item 3.4.5.1, para os casos onde este modelo é aplicável (jatos verticais ou com inclinação até 45° e formados apenas por vapor), enquanto que os modelos adotados para casos diferentes destes são o JSFH-Cook e o JSFH-Johnson, descritos no mesmo item deste trabalho. Dessa forma, todos os possíveis casos de incêndio em jato para o problema estudado são atendidos.

Para a modelagem da radiação emitida devido a um incêndio em poça, esta metodologia propõe a utilização dos modelos empíricos apresentados em TNO (2005), através do modelo POLF, citado no item 3.4.5.2 deste trabalho, o qual atende às diversas possibilidades de incêndio em poça decorrentes da liberação de amônia.

A modelagem da radiação térmica emitida no caso de uma bola de fogo deve seguir, entre aqueles citados no item 3.4.5.3, o modelo proposto pela DNV-GL, que faz uma combinação dos modelos TNO e HSE, também citados no mesmo item.

4.5 Cálculo do risco

O cálculo do risco – tanto social quanto individual – devido à utilização de amônia na instalação é realizado através da combinação da frequência de ocorrência de cada cenário acidental, identificada conforme apresentado no item 4.3 e da consequência do cenário analisado, calculada em suas diversas formas conforme apresentado no item 4.4, considerando-se também a distribuição da população ao redor do ponto de liberação e as diversas possíveis condições climáticas.

4.6 Avaliação dos resultados

Após a análise de risco realizada, os resultados obtidos deverão ser avaliados e comparados com padrões normativos nacionais e internacionais, ou, quando isso

não for possível, comparados com padrões aceitos pela comunidade internacional. Dessa forma, será obtida uma avaliação da tolerabilidade do risco da instalação. Assim, caso os valores obtidos na análise estejam em níveis toleráveis, a instalação terá seu risco considerado tolerável. Caso contrário, medidas para a redução do risco – sejam elas com o objetivo de se diminuir a probabilidade de ocorrência de um potencial evento de perigo ou com o objetivo de se minimizar as consequências em caso de ocorrência desse evento – poderão ser elaboradas e propostas. Tais medidas devem ter como base a identificação dos cenários que mais contribuem para o risco da instalação. Dessa forma, deve-se realizar um processo iterativo com o objetivo de se atingir um nível de risco tolerável.

5 Estudo de Caso

Neste capítulo, a metodologia apresentada no Capítulo 4 é aplicada a um sistema real, como forma de se avaliar a sua aplicabilidade e utilidade, e sendo assim, está dividido na mesma sequência dos itens propostos pela metodologia. Algumas das características da instalação foram adaptadas, de forma a incrementar a abrangência do estudo.

5.1 Familiarização

No estudo de caso do presente trabalho foi analisado o sistema de estocagem de amônia de uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio localizada no município de Iperó, no estado de São Paulo. Tal instalação faz parte do processo de fabricação do combustível nuclear, fazendo o processamento do material conhecido por *yellowcake* (U_3O_8) para a obtenção do gás hexafluoreto de urânio (UF_6).

Neste tipo de instalação, a amônia é utilizada para a reação com o nitrato de urânio (NTU) para a produção de diuranato de amônio (DUA).

O sistema de estocagem e distribuição de amônia é composto por:

- 1 vaso de estocagem;
- 1 compressor centrífugo;
- 1 vaso pulmão;
- 1 vaso absorvedor;
- 12 metros de tubulação de 2", por onde se transfere amônia gasosa durante o abastecimento do vaso de estocagem;
- 7 metros de tubulação de 3", por onde se transfere amônia líquida durante o abastecimento do vaso de estocagem;
- 25 metros de tubulação de 3", por onde se transfere amônia gasosa para o processo;
- 5 metros de tubulação de 3", por onde se transfere amônia líquida para o evaporador;
- 10 metros de tubulação de 1", por onde se transfere amônia gasosa em caso de abertura das válvulas de alívio de pressão (PSV);
- 1 válvula de retenção;

- 17 válvulas globo;
- 3 válvulas de alívio de pressão;
- 2 mangotes flexíveis com 2 metros de comprimento cada;
- 1 evaporador de tubos com convecção natural.

Este sistema armazena e distribui um inventário máximo de 5000 kg de amônia liquefeita, sendo que o vaso de estocagem possui uma bacia de contenção com 49 m² de área e parede com altura de 0,8 m capaz de armazenar todo o inventário do produto.

Em operação normal, a amônia fica armazenada em temperatura ambiente no vaso de estocagem, pressurizada entre 6 e 13,5 bar manométricos para a manutenção da amônia em estado líquido. A Figura 8 retrata didaticamente o sistema, com as setas hachuradas representando as possíveis direções do fluxo da amônia para cada trecho de tubulação.

A análise feita neste estudo de caso contempla os procedimentos de abastecimento, estocagem e o envio da amônia para utilização no processo, não estando englobado no presente estudo o transporte da amônia via caminhão para a unidade, bem como sua utilização nos processos da mesma, sendo estes possíveis temas de análises futuras.

Assim sendo, inicialmente é importante descrever o processo de carregamento do vaso de estocagem de amônia. Esse processo é realizado sempre que houver a necessidade de se reabastecer o suprimento de amônia da instalação. Para isto, o procedimento operacional da instalação indica que o abastecimento deverá iniciar com todas as válvulas fechadas, com exceção da VG9, VG10, VG11, VG12 e VG13, que permanecerão sempre abertas. Com o caminhão posicionado e os mangotes flexíveis conectados, as linhas de transferência devem ser alinhadas, com a abertura das válvulas VG1, VG2 e VG16, até que a pressão interna ao caminhão se iguale à pressão interna do vaso, transferindo assim amônia líquida do caminhão para o vaso de estocagem. A seguir (ou no caso de a pressão dentro do caminhão ser igual ou inferior à pressão interna do tanque), a tubulação gasosa é alinhada para o sistema de compressão através da abertura das válvulas VG3, VG4, VG5, VG6 e VG15. Neste momento, o compressor é ligado, de forma que a amônia dentro do caminhão seja comprimida até uma pressão ligeiramente superior à pressão interna ao tanque, transferindo a amônia líquida. Essa diferença de pressão deve ser mantida até que

Figura 8 – Esquema simplificado do sistema estudado

toda a amônia líquida do caminhão tenha sido transferida para o vaso de estocagem, sendo o vaso pulmão o responsável pelo controle e equilíbrio da pressão.

Nesse instante, o compressor é desligado e o alinhamento da tubulação invertido, de forma a transferir a amônia gasosa restante no caminhão para o vaso de estocagem, através do fechamento das válvulas VG4 e VG5 e da abertura das válvulas VG7 e VG8, de forma a se transferir todo o inventário de amônia transportado.

Para o processo, a amônia é encaminhada por diferença de pressão através da abertura das válvulas VG14 e VG17, sendo transferida na forma líquida através de um “pescador”, o qual retira o material do fundo do vaso de estocagem. A amônia líquida é encaminhada via tubulação para o evaporador, de onde sai na forma gasosa, pronta para utilização no processo.

O vaso de estocagem possui duas válvulas de alívio de pressão redundantes (PSV1 e PSV2) que, em caso de aumento da pressão interna do tanque para um valor maior que 13,5 bar, abrem-se encaminhando a amônia via tubulação para o vaso absorvedor, onde a amônia gasosa é borbulhada em água, de forma a não se permitir a liberação de amônia diretamente para o meio ambiente.

O vaso de estocagem também possui um indicador de nível (LI), por onde é verificada a quantidade de amônia armazenada para se definir o momento adequado de uma nova recarga, e um indicador de pressão (PI), por onde o operador identifica possíveis variações de pressão interna ao vaso, podendo atuar preventivamente. Além disso, o vaso pulmão também possui um indicador de pressão (PI), para monitoramento local desta, e uma válvula de alívio de pressão (PSV3).

As válvulas VG9, VG10, VG11, VG12 e VG13 permanecem abertas, sendo fechadas apenas em caso de procedimento operacional de manutenção na planta.

5.2 Identificação de perigos

Conforme indicado no item 4.2, foi realizada a identificação de perigos e análise qualitativa do sistema analisado através da técnica de análise preliminar de perigos. O grupo de analistas incluiu dois especialistas da operação e um especialista de projeto da instalação, além de dois especialistas na aplicação da técnica da APP. A tabela com os resultados dessa análise está apresentada no Apêndice A. Para a

matriz de risco foram adotadas as categorias de frequência de ocorrência e de impactos definidas previamente pelo grupo de especialistas e apresentadas respectivamente nas Tabela 7 e Tabela 8, sendo a matriz de riscos apresentada na Tabela 9.

Tabela 7 – Categorias de frequências de ocorrência para a APP

Frequência de ocorrência	
1	Frequência maior que 10^{-3} por ano
2	Frequência entre 10^{-5} e 10^{-3} por ano
3	Frequência entre 10^{-6} e 10^{-5} por ano
4	Frequência menor que 10^{-6} por ano

Tabela 8 – Categorias de impactos para a APP

Impacto	
1	Mortes ou danos irreversíveis à saúde em indivíduos do público
2	Danos reversíveis à saúde de indivíduos do público e/ou mortes ou danos irreversíveis a trabalhadores
3	Incômodo temporário à saúde de indivíduos do público e/ou danos reversíveis a trabalhadores
4	Nenhuma lesão ou efeito à saúde de indivíduos do público e/ou incômodo temporário a trabalhadores

Tabela 9 – Matriz de riscos para a APP

Frequência	Impacto			
	1	2	3	4
1	I – Inaceitável	I – Inaceitável	II – Indesejável	III – Tolerável com controles
2	I – Inaceitável	II – Indesejável	III – Tolerável com controles	IV – Tolerável
3	I – Inaceitável	II – Indesejável	III – Tolerável com controles	IV – Tolerável
4	II – Indesejável	III – Tolerável com controles	IV – Tolerável	IV – Tolerável

Nessa matriz de riscos, a categoria “Inaceitável” é entendida como sendo aquela onde o risco deve ser mitigado imediatamente (ou antes do início da operação da planta) através de ações de engenharia e/ou administrativas. Na categoria “Indesejável” o risco deve ser mitigado assim que possível através de ações de engenharia e/ou administrativas. “Tolerável com controles” é entendido como sendo o risco para o qual procedimentos de segurança devem ser aplicados e reavaliados com alta periodicidade. E, finalmente, a categoria “Tolerável” é aquela para a qual o

risco da planta não demanda ações adicionais além do procedimento operacional padrão.

5.3 Estimativa das probabilidades de ocorrência

Após a análise qualitativa pela APP, seguiu-se para a análise quantitativa, onde foram estimadas probabilidades de ocorrência para seis possíveis cenários acidentais (pequeno, médio ou grande vazamentos de amônia líquida ou gasosa) para cada um dos três processos previstos para a instalação. Neste estudo adotou-se como sendo um grande vazamento o equivalente a um furo com diâmetro de 3" (maior diâmetro de tubulação para este sistema); para um médio vazamento adotou-se o equivalente a um furo com diâmetro de 0,5", enquanto que para um pequeno vazamento adotou-se como dimensão um furo com diâmetro de 0,1".

A estimativa das probabilidades de ocorrência dos eventos acidentais postulados foi obtida através da utilização de redes bayesianas (RB), conforme citado em 4.3. Para a aplicação desta técnica utilizou-se o software *Netica* (Norsys, 2013). Foi considerada para todos os componentes uma distribuição exponencial (taxas de falhas constantes no tempo), sendo os valores de probabilidade acumulada de falha dos componentes obtidos através da eq. (10).

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (10)$$

onde $F(t)$ é a probabilidade acumulada de falha do componente, λ a taxa de falha do componente e t o tempo de missão adotado.

As taxas de falha para o modo de falha de vazamento externo dos componentes foram retiradas preferencialmente de DNV (2013). Para outros modos de falha, ou quando os dados não eram encontrados na referência citada, foram adotadas taxas de falha de USNRC (1983), CCPS (1989), RIAC (2011) e HSE (2012).

5.3.1 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de abastecimento

Para a elaboração da RB de abastecimento foi considerado que esse procedimento totaliza um tempo de missão anual de 12 horas, sendo realizadas 6 operações de

abastecimento com duração de 2 horas cada por ano (frequência esperada entre manutenções anuais da planta).

Para a RB de abastecimento, foi considerado que um vazamento nas válvulas VG3, VG4, VG5, VG6, VG7, VG8, VG14, VG15 (atuadas) ou VG9, VG10, VG11 ou VG12 (manuais) levaria a um vazamento de amônia gasosa, enquanto que um vazamento nas válvulas VG1, VG2, VG16 (atuadas) ou VG13 (manual) levaria a um vazamento de amônia líquida. Um vazamento no vaso de estocagem pode se dar por uma falha diretamente no corpo do vaso ou através do aumento da pressão interna do vaso associado a falhas em se aliviar a pressão e em se detectar a elevação desta. No vaso pulmão, a amônia só pode vazar em estado gasoso e caso as válvulas VG4 e VG7 estejam abertas; o vazamento acontece caso ocorra uma falha no corpo do vaso pulmão ou caso haja um aumento de pressão interna, associado a falhas no alívio da pressão e na detecção da mesma. Também foi considerada a possibilidade de ocorrência de um vazamento no compressor, que estaria condicionado, além da falha no compressor, à abertura da válvula VG7, e levaria a uma liberação de amônia gasosa. Nos mangotes foram considerados como possíveis estados de falha a ruptura do mangote e o erro de conexão deste, sendo que o primeiro caso levaria a um grande vazamento, enquanto o segundo seria equivalente a um médio vazamento. Além disso, foi considerada a possibilidade de vazamento na tubulação que fica após as PSV, condicionado à abertura destas durante o procedimento de abastecimento.

A RB de abastecimento é apresentada na Figura 9, sendo apresentados na Tabela 10 os dados utilizados como taxas de falha dos componentes (em operação normal e em *standby*, quando aplicável), o tempo de missão adotado para cada um deles e a probabilidade de ocorrência. Ressalta-se que o tempo de missão total apresentado para cada componente (somando-se tempo de missão em operação e em *standby*) é igual apenas ao tempo de missão do processo de abastecimento, caso o componente em questão seja utilizado em algum outro processo na presente análise, ou igual ao tempo de missão de um ano, caso o componente tenha sua função associada apenas ao abastecimento do vaso de estocagem de amônia. Dessa forma, cada componente terá tempo total de missão de um ano, somando-se os três processos analisados.

Figura 9 – Rede bayesiana para o processo de abastecimento

Tabela 10 – Dados dos componentes envolvidos no processo de abastecimento

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
Vaso de estocagem – grande vazamento	1,40E-5	1,37E-3	-	-	-	-	1,918E-8	(1)
Vaso de estocagem – médio vazamento	1,00E-5	1,37E-3	-	-	-	-	1,370E-8	(1)
Vaso de estocagem – pequeno vazamento	4,00E-5	1,37E-3	-	-	-	-	5,480E-8	(1)
VR1 – grande vazamento	5,18E-6	1,37E-3	7,09E-9	1,81E-6	9,99E-1	1,81E-6	1,813E-6	(2)
VR1 – médio vazamento	3,66E-5	1,37E-3	5,01E-8	3,03E-6	9,99E-1	3,03E-6	3,078E-6	(2)
VR1 – pequeno vazamento	5,85E-5	1,37E-3	8,01E-8	2,27E-6	9,99E-1	2,27E-6	2,346E-6	(2)
VG1 – falha fechada	3,00E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,996E-3	(3)
VG4 – falha fechada	3,00E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,996E-3	(3)
VG7 – falha fechada	3,00E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,996E-3	(3)
VG9 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
VG10 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
VG11 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
VG16 – falha fechada	3,00E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,996E-3	(3)
Tubulação amônia líquida (3") – grande vazamento	4,58E-6	1,37E-3	4,39E-8	3,89E-6	9,99E-1	2,72E-5	2,721E-5	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
Tubulação amônia líquida (3") – médio vazamento	2,48E-5	1,37E-3	2,38E-7	3,76E-6	9,99E-1	2,63E-5	2,655E-5	(2)
Tubulação amônia líquida (3") – pequeno vazamento	5,27E-5	1,37E-3	5,05E-7	3,02E-6	9,99E-1	2,11E-5	2,163E-5	(2)
Compressor centrífugo – grande vazamento	3,31E-4	1,37E-3	4,53E-7	1,67E-4	9,99E-1	1,67E-4	1,674E-4	(2)
Compressor centrífugo – médio vazamento	3,28E-3	1,37E-3	4,50E-6	2,00E-4	9,99E-1	2,00E-4	2,046E-4	(2)
Compressor centrífugo – pequeno vazamento	5,58E-3	1,37E-3	7,65E-6	1,32E-4	9,99E-1	1,32E-4	1,399E-4	(2)
PSV1 – falha em abrir	2,12E-4	por demanda	-	-	-	-	2,12E-4	(4)
PSV2 – falha em abrir	2,12E-4	por demanda	-	-	-	-	2,12E-4	(4)
PSV3 – falha em abrir	2,12E-4	por demanda	-	-	-	-	2,12E-4	(4)
Indicador de pressão – indicação incorreta	7,55E-2	1,00E+0	-	-	-	-	7,271E-2	(3)
Tubulação após as PSVs (1") – grande vazamento	0,00E+0	1,14E-4	0,00E+0	0,00E+0	1,26E-3	0,00E+0	0,000E+0	(2)
Tubulação após as PSVs (1") – médio vazamento	1,46E-4	1,14E-4	1,66E-7	1,09E-5	1,26E-3	1,37E-7	3,033E-7	(2)
Tubulação após as PSVs (1") – pequeno vazamento	2,85E-4	1,14E-4	3,25E-7	4,77E-6	1,26E-3	5,99E-8	3,853E-7	(2)
Vaso pulmão – grande vazamento	1,21E-4	1,37E-3	1,66E-7	3,71E-4	9,99E-1	3,70E-4	3,705E-4	(2)
Vaso pulmão – médio vazamento	6,33E-4	1,37E-3	8,67E-7	2,80E-4	9,99E-1	2,80E-4	2,805E-4	(2)
Vaso pulmão – pequeno vazamento	7,86E-4	1,37E-3	1,08E-6	1,60E-4	9,99E-1	1,60E-4	1,608E-4	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
Tubulação amônia vapor (2") – grande vazamento	6,10E-6	1,37E-3	8,35E-9	4,22E-6	9,99E-1	4,21E-6	5,062E-5	(2)
Tubulação amônia vapor (2") – médio vazamento	4,85E-5	1,37E-3	6,64E-8	4,42E-6	9,99E-1	4,42E-6	5,381E-5	(2)
Tubulação amônia vapor (2") – pequeno vazamento	1,03E-4	1,37E-3	1,41E-7	3,55E-6	9,99E-1	3,55E-6	4,425E-5	(2)
VG1 – grande vazamento	2,03E-5	1,37E-3	2,78E-8	8,61E-6	9,99E-1	8,59E-6	8,622E-6	(2)
VG1 – médio vazamento	2,21E-4	1,37E-3	3,03E-7	1,58E-5	9,99E-1	1,58E-5	1,611E-5	(2)
VG1 – pequeno vazamento	5,49E-4	1,37E-3	7,52E-7	1,29E-5	9,99E-1	1,29E-5	1,366E-5	(2)
VG2 – grande vazamento	2,03E-5	1,37E-3	-	-	-	-	2,775E-8	(2)
VG2 – médio vazamento	2,21E-4	1,37E-3	-	-	-	-	3,026E-7	(2)
VG2 – pequeno vazamento	5,49E-4	1,37E-3	-	-	-	-	7,517E-7	(2)
VG3 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	-	-	-	-	2,764E-8	(2)
VG3 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	-	-	-	-	3,001E-7	(2)
VG3 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	-	-	-	-	7,458E-7	(2)
VG4 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG4 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG4 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG5 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG5 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG5 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)
VG6 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG6 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG6 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)
VG7 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG7 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG7 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)
VG8 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG8 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG8 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)
VG9 – grande vazamento	0,00E+0	1,37E-3	-	-	-	-	0,000E+0	(2)
VG9 – médio vazamento	4,25E-5	1,37E-3	-	-	-	-	5,820E-8	(2)
VG9 – pequeno vazamento	5,18E-5	1,37E-3	-	-	-	-	7,097E-8	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG10 – grande vazamento	0,00E+0	1,37E-3	-	-	-	-	0,000E+0	(2)
VG10 – médio vazamento	4,25E-5	1,37E-3	-	-	-	-	5,820E-8	(2)
VG10 – pequeno vazamento	5,18E-5	1,37E-3	-	-	-	-	7,097E-8	(2)
VG11 – grande vazamento	0,00E+0	1,14E-4	0,00E+0	0,00E+0	1,26E-3	0,00E+0	0,000E+0	(2)
VG11 – médio vazamento	3,77E-5	1,14E-4	4,30E-9	1,25E-6	1,26E-3	1,56E-9	5,864E-9	(2)
VG11 – pequeno vazamento	5,26E-5	1,14E-4	6,00E-9	5,84E-7	1,26E-3	7,33E-10	6,738E-9	(2)
VG12 – grande vazamento	0,00E+0	1,37E-3	-	-	-	-	0,000E+0	(2)
VG12 – médio vazamento	4,25E-5	1,37E-3	-	-	-	-	5,820E-8	(2)
VG12 – pequeno vazamento	5,18E-5	1,37E-3	-	-	-	-	7,097E-8	(2)
VG13 – grande vazamento	0,00E+0	1,37E-3	-	-	-	-	0,000E+0	(2)
VG13 – médio vazamento	4,25E-5	1,37E-3	-	-	-	-	5,820E-8	(2)
VG13 – pequeno vazamento	5,18E-5	1,37E-3	-	-	-	-	7,097E-8	(2)
VG14 – grande vazamento	2,14E-5	1,37E-3	-	-	-	-	2,932E-8	(2)
VG14 – médio vazamento	2,33E-4	1,37E-3	-	-	-	-	3,196E-7	(2)
VG14 – pequeno vazamento	5,66E-4	1,37E-3	-	-	-	-	7,749E-7	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG15 – grande vazamento	2,02E-5	1,37E-3	2,76E-8	6,84E-6	9,99E-1	6,83E-6	6,856E-6	(2)
VG15 – médio vazamento	2,19E-4	1,37E-3	3,00E-7	1,22E-5	9,99E-1	1,21E-5	1,243E-5	(2)
VG15 – pequeno vazamento	5,44E-4	1,37E-3	7,46E-7	9,93E-6	9,99E-1	9,91E-6	1,066E-5	(2)
VG16 – grande vazamento	2,03E-5	1,37E-3	2,78E-8	8,61E-6	9,99E-1	8,59E-6	8,622E-6	(2)
VG16 – médio vazamento	2,21E-4	1,37E-3	3,03E-7	1,58E-5	9,99E-1	1,58E-5	1,611E-5	(2)
VG16 – pequeno vazamento	5,49E-4	1,37E-3	7,52E-7	1,29E-5	9,99E-1	1,29E-5	1,366E-5	(2)
Mangote FLEX1 – vazamento	4,99E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,49E-3	(3)
Mangote FLEX2 – vazamento	4,99E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,49E-3	(3)
Mangote FLEX1 – erro de conexão	-	-	-	-	-	-	3,000E-3	(5)
Mangote FLEX2 – erro de conexão	-	-	-	-	-	-	3,000E-3	(5)

Fonte: HSE (2012) ⁽¹⁾; DNV (2013) ⁽²⁾; RIAC (2011) ⁽³⁾; CCPS (1989) ⁽⁴⁾; USNRC (1983) ⁽⁵⁾.

5.3.2 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de estocagem

Na RB de estocagem, o tempo de missão considerado para o processo foi de 8308 horas, que representa o período de um ano (intervalo entre manutenções da planta) menos o tempo de duração das operações de abastecimento e distribuição.

Na RB de estocagem foi considerada a mesma lógica apresentada na RB de abastecimento para os vazamentos a partir do vaso de estocagem. Também foi considerada, igualmente, a possibilidade de vazamento na tubulação localizada após as PSV. Na válvula VG13 foi considerada a possibilidade de vazamento de amônia líquida, enquanto que para as outras válvulas foi considerada a possibilidade de liberação de amônia gasosa, diferenciando as válvulas manuais (VG9, VG10 e VG12) das atuadas (VG2, VG3 e VG14).

A RB de estocagem é apresentada na Figura 10, sendo apresentados na Tabela 11 os dados utilizados como taxas de falha dos componentes (em operação normal e em *standby*, quando aplicável), o tempo de missão adotado para cada um deles e a probabilidade de ocorrência. Assim como descrito em 5.3.1, o tempo de missão total de cada componente, somando tempo de missão em operação e em *standby*, poderá ser de um ano, caso o componente esteja relacionado apenas ao processo de estocagem, ou igual ao tempo de duração apenas do processo de estocagem (8308 h), caso ele também faça parte de algum outro processo analisado.

Figura 10 – Rede bayesiana para o processo de estocagem

Tabela 11 – Dados dos componentes envolvidos no processo de estocagem

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
Vaso de estocagem – grande vazamento	1,40E-5	9,48E-1	-	-	-	-	1,328E-5	(1)
Vaso de estocagem – médio vazamento	1,00E-5	9,48E-1	-	-	-	-	9,484E-6	(1)
Vaso de estocagem – pequeno vazamento	4,00E-5	9,48E-1	-	-	-	-	3,794E-5	(1)
Tubulação após as PSVs (1") – grande vazamento	0,00E+0	2,28E-5	0,00E+0	0,00E+0	9,48E-1	0,00E+0	0,000E+0	(2)
Tubulação após as PSVs (1") – médio vazamento	1,46E-4	2,28E-5	3,32E-8	1,09E-5	9,48E-1	1,04E-4	1,036E-4	(2)
Tubulação após as PSVs (1") – pequeno vazamento	2,85E-4	2,28E-5	6,51E-8	4,77E-6	9,48E-1	4,52E-5	4,528E-5	(2)
VG2 – grande vazamento	2,14E-5	9,48E-1	-	-	-	-	2,030E-5	(2)
VG2 – médio vazamento	2,33E-4	9,48E-1	-	-	-	-	2,212E-4	(2)
VG2 – pequeno vazamento	5,66E-4	9,48E-1	-	-	-	-	5,363E-4	(2)
VG3 – grande vazamento	2,13E-5	9,48E-1	-	-	-	-	2,021E-5	(2)
VG3 – médio vazamento	2,31E-4	9,48E-1	-	-	-	-	2,195E-4	(2)
VG3 – pequeno vazamento	5,61E-4	9,48E-1	-	-	-	-	5,320E-4	(2)
VG9 – grande vazamento	0,00E+0	9,48E-1	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG9 – médio vazamento	4,25E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,029E-5	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG9 – pequeno vazamento	5,18E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,913E-5	(2)
VG10 – grande vazamento	0,00E+0	9,48E-1	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG10 – médio vazamento	4,25E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,029E-5	(2)
VG10 – pequeno vazamento	5,18E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,913E-5	(2)
VG11 – grande vazamento	0,00E+0	2,28E-5	0,00E+0	0,00E+0	9,48E-1	0,00E+0	0,000E+0	(2)
VG11 – médio vazamento	3,77E-5	2,28E-5	8,60E-10	1,25E-6	9,48E-1	1,18E-6	1,182E-6	(2)
VG11 – pequeno vazamento	5,26E-5	2,28E-5	1,20E-9	5,84E-7	9,48E-1	5,54E-7	5,551E-7	(2)
VG12 – grande vazamento	0,00E+0	9,48E-1	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG12 – médio vazamento	4,25E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,029E-5	(2)
VG12 – pequeno vazamento	5,18E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,913E-5	(2)
VG13 – grande vazamento	0,00E+0	9,48E-1	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG13 – médio vazamento	4,25E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,029E-5	(2)
VG13 – pequeno vazamento	5,18E-5	9,48E-1	-	-	-	-	4,913E-5	(2)
VG14 – grande vazamento	2,14E-5	9,48E-1	-	-	-	-	2,030E-5	(2)
VG14 – médio vazamento	2,33E-4	9,48E-1	-	-	-	-	2,212E-4	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG14 – pequeno vazamento	5,66E-4	9,48E-1	-	-	-	-	5,363E-4	(2)
VG9 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
VG10 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
VG11 – falha fechada	2,22E-3	1,00E+0	-	-	-	-	2,213E-3	(3)
Indicador de pressão – indicação incorreta	7,55E-2	1,00E+0	-	-	-	-	7,271E-2	(3)
PSV1 – falha em abrir	2,12E-4	por demanda	-	-	-	-	2,12E-4	(4)
PSV2 – falha em abrir	2,12E-4	por demanda	-	-	-	-	2,12E-4	(4)

Fonte: HSE (2012) ⁽¹⁾; DNV (2013) ⁽²⁾; RIAC (2011) ⁽³⁾; CCPS (1989) ⁽⁴⁾.

5.3.3 Estimativa da probabilidade de ocorrência na RB de distribuição

Na RB de distribuição, o tempo de duração adotado para o processo foi de 440 horas, que corresponde a 220 operações de distribuição de amônia com duração de 2 horas cada, realizadas ao longo de um ano.

Nessa RB foi desconsiderada a possibilidade de haver aumento de pressão no vaso de estocagem, uma vez que, neste processo, há a retirada de amônia do vaso. Assim, a possibilidade de ocorrer vazamento no vaso de estocagem se refere apenas à possibilidade de falha estrutural deste. Também foi considerada a possibilidade de haver vazamento de amônia líquida nas VG13 e VG14, e de haver vazamento de amônia gasosa pelas válvulas VG2, VG3, VG9, VG10, VG12 ou VG17. Além disso, também foram considerados os trechos de tubulação por onde a amônia corre líquida (antes do evaporador – trecho de 5 m) e gasosa (depois do evaporador – trecho de 25 m) neste processo.

A RB de distribuição é apresentada na Figura 11, sendo apresentados na Tabela 12 os dados utilizados como taxas de falha dos componentes (em operação normal e em *standby*, quando aplicável), o tempo de missão adotado para cada um deles e a probabilidade de ocorrência. Da mesma forma que apresentado em 5.3.1, o tempo de missão total de um componente poderá ser de um ano, caso o componente esteja relacionado apenas ao processo de distribuição, ou igual ao tempo de duração apenas do processo de distribuição (440 h), caso ele também faça parte de algum outro processo analisado.

Figura 11 – Rede bayesiana para o processo de distribuição

Tabela 12 – Dados dos componentes envolvidos no processo de distribuição

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
Vaso de estocagem – grande vazamento	1,40E-5	5,02E-2	-	-	-	-	7,032E-7	(1)
Vaso de estocagem – médio vazamento	1,00E-5	5,02E-2	-	-	-	-	5,023E-7	(1)
Vaso de estocagem – pequeno vazamento	4,00E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,009E-6	(1)
Tubulação antes do evaporador (3") – grande vazamento	4,58E-6	5,02E-2	1,15E-6	3,89E-6	9,50E-1	1,85E-5	1,960E-5	(2)
Tubulação antes do evaporador (3") – médio vazamento	2,48E-5	5,02E-2	6,22E-6	3,76E-6	9,50E-1	1,79E-5	2,410E-5	(2)
Tubulação antes do evaporador (3") – pequeno vazamento	5,27E-5	5,02E-2	1,32E-5	3,02E-6	9,50E-1	1,44E-5	2,759E-5	(2)
Tubulação após o evaporador (3") – grande vazamento	4,58E-6	5,02E-2	5,75E-6	3,89E-6	9,50E-1	9,23E-5	9,802E-5	(2)
Tubulação após o evaporador (3") – médio vazamento	2,48E-5	5,02E-2	3,11E-5	3,76E-6	9,50E-1	8,94E-5	1,205E-4	(2)
Tubulação após o evaporador (3") – pequeno vazamento	5,27E-5	5,02E-2	6,62E-5	3,02E-6	9,50E-1	7,18E-5	1,379E-4	(2)
VG2 – grande vazamento	2,14E-5	5,02E-2	-	-	-	-	1,075E-6	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG2 – médio vazamento	2,33E-4	5,02E-2	-	-	-	-	1,172E-5	(2)
VG2 – pequeno vazamento	5,66E-4	5,02E-2	-	-	-	-	2,841E-5	(2)
VG3 – grande vazamento	2,13E-5	5,02E-2	-	-	-	-	1,070E-6	(2)
VG3 – médio vazamento	2,31E-4	5,02E-2	-	-	-	-	1,163E-5	(2)
VG3 – pequeno vazamento	5,61E-4	5,02E-2	-	-	-	-	2,818E-5	(2)
VG9 – grande vazamento	0,00E+0	5,02E-2	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG9 – médio vazamento	4,25E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,134E-6	(2)
VG9 – pequeno vazamento	5,18E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,602E-6	(2)
VG10 – grande vazamento	0,00E+0	5,02E-2	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG10 – médio vazamento	4,25E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,134E-6	(2)
VG10 – pequeno vazamento	5,18E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,602E-6	(2)
VG12 – grande vazamento	0,00E+0	5,02E-2	-	-	-	-	0,00E+0	(2)
VG12 – médio vazamento	4,25E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,134E-6	(2)
VG12 – pequeno vazamento	5,18E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,602E-6	(2)
VG13 – grande vazamento	0,00E+0	5,02E-2	-	-	-	-	0,00E+0	(2)

Componente	Taxa de falha em operação (/ano)	Tempo de missão em operação (anos)	Probabilidade de falha em operação	Taxa de falha em <i>standby</i> (/ano)	Tempo de missão em <i>standby</i> (anos)	Probabilidade de falha em <i>standby</i>	Probabilidade de falha total	Fonte
VG13 – médio vazamento	4,25E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,134E-6	(2)
VG13 – pequeno vazamento	5,18E-5	5,02E-2	-	-	-	-	2,602E-6	(2)
VG14 – grande vazamento	2,03E-5	5,02E-2	-	-	-	-	1,018E-6	(2)
VG14 – médio vazamento	2,21E-4	5,02E-2	-	-	-	-	1,110E-5	(2)
VG14 – pequeno vazamento	5,49E-4	5,02E-2	-	-	-	-	2,756E-5	(2)
VG17 – grande vazamento	2,03E-5	5,02E-2	1,02E-6	8,61E-6	9,50E-1	8,17E-6	9,191E-6	(2)
VG17 – médio vazamento	2,21E-4	5,02E-2	1,11E-5	1,58E-5	9,50E-1	1,50E-5	2,613E-5	(2)
VG17 – pequeno vazamento	5,49E-4	5,02E-2	2,76E-5	1,29E-5	9,50E-1	1,23E-5	3,984E-5	(2)

Fonte: HSE (2012) ⁽¹⁾; DNV (2013) ⁽²⁾.

5.3.4 Probabilidades de ocorrência e diagnóstico de causas mais prováveis

Os resultados obtidos a partir das redes bayesianas para os nós que indicam a ocorrência de vazamento de amônia estão apresentados na Tabela 13.

Além dos resultados de frequência de ocorrência, as RB permitem a identificação das causas mais prováveis de falha dada a ocorrência de um evento de vazamento. Essa informação possui grande utilidade para a identificação de componentes críticos da instalação e proposição de medidas de mitigação.

Tabela 13 – Frequências anuais de vazamento

Processo	Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Frequência anual
Abastecimento	Líquido	Grande	5,01E-3
		Médio	3,05E-3
		Pequeno	5,24E-5
	Gasoso	Grande	5,60E-3
		Médio	3,61E-3
		Pequeno	4,07E-4
Estocagem	Líquido	Grande	1,20E-4
		Médio	2,71E-4
		Pequeno	6,23E-4
	Gasoso	Grande	1,41E-4
		Médio	6,76E-4
		Pequeno	1,30E-3
Distribuição	Líquido	Grande	2,13E-5
		Médio	3,78E-5
		Pequeno	5,98E-5
	Gasoso	Grande	1,10E-4
		Médio	1,77E-4
		Pequeno	2,44E-4

Considerando-se uma evidência de ocorrência de um evento de vazamento nas RB, foram obtidas as variações das probabilidades dos estados dos nós da rede, identificando-se as causas mais prováveis de um possível vazamento. Os valores de probabilidade originais dos estados de interesse nos nós pais dos nós

“VazamentoAmoniaLiquida” e “VazamentoAmoniaGasosa”, além dos valores após a consideração da evidência, estão apresentados na Tabela 14 e Tabela 15 para a RB de abastecimento, na Tabela 16 e Tabela 17 para a RB de estocagem, e na Tabela 18 e Tabela 19 para a RB de distribuição. Foram considerados como estados de interesse nos nós apenas aqueles estados que sofreram variação positiva dada a ocorrência da evidência, uma vez que se tratam daqueles que indicam as causas mais prováveis do eventual vazamento.

Tabela 14 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da RB de abastecimento

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande vazamento	MangoteFLEX1	vazamento	4,96E-3	9,91E-1
	ValvsAtuadas_AmoniaLiquida	grande vazamento	1,73E-5	3,45E-3
	Tub_AmoniaLiquida	grande vazamento	2,70E-5	5,40E-3
	VR1	grande vazamento	1,80E-6	3,60E-4
	VasoEstocagem	grande vazamento	4,66E-7	9,31E-5
médio vazamento	MangoteFLEX1	erro de conexão	3,00E-3	9,80E-1
	ValvsAtuadas_AmoniaLiquida	médio vazamento	3,28E-5	1,07E-2
	Tub_AmoniaLiquida	médio vazamento	2,64E-5	8,60E-3
	VR1	médio vazamento	3,06E-6	9,97E-4
	VasoEstocagem	médio vazamento	1,37E-8	4,47E-6
	ValvManual_AmoniaLiquida	médio vazamento	5,82E-8	1,90E-5
pequeno vazamento	ValvsAtuadas_AmoniaLiquida	pequeno vazamento	2,88E-5	5,46E-1
	Tub_AmoniaLiquida	pequeno vazamento	2,15E-5	4,07E-1
	VR1	pequeno vazamento	2,33E-6	4,42E-2
	VasoEstocagem	pequeno vazamento	5,48E-8	1,04E-3
	ValvManual_AmoniaLiquida	pequeno vazamento	7,10E-8	1,34E-3

Tabela 15 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da RB de abastecimento

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande vazamento	MangoteFLEX2	vazamento	4,98E-3	8,88E-1
	Compressor	grande vazamento	1,67E-4	2,99E-2
	VasoPulmao	grande vazamento	3,71E-4	6,62E-2
	ValvulasAtuadas_AmoniaGasosa	grande vazamento	4,12E-5	7,34E-3
	Tub_AmoniaGasosa	grande vazamento	5,06E-5	9,03E-3
médio vazamento	MangoteFLEX2	erro de conexão	3,00E-3	8,31E-1
	ValvulasAtuadas_AmoniaGasosa	médio vazamento	7,49E-5	2,06E-2
	Tub_AmoniaGasosa	médio vazamento	5,38E-5	1,48E-2
	ValvsManuais_AmoniaGasosa	médio vazamento	1,75E-7	4,81E-5
	Compressor	médio vazamento	2,05E-4	5,64E-2
	VasoPulmao	médio vazamento	2,81E-4	7,74E-2
	VazamentoExterno_VG11	médio vazamento	5,85E-9	1,61E-6
	TubAposPSVs	médio vazamento	3,03E-7	8,34E-5
pequeno vazamento	ValvulasAtuadas_AmoniaGasosa	pequeno vazamento	6,47E-5	1,58E-1
	Tub_AmoniaGasosa	pequeno vazamento	4,43E-5	1,08E-1
	ValvsManuais_AmoniaGasosa	pequeno vazamento	1,75E-7	5,19E-4
	Compressor	pequeno vazamento	1,40E-4	3,41E-1
	VasoPulmao	pequeno vazamento	1,61E-4	3,92E-1
	VazamentoExterno_VG11	pequeno vazamento	6,72E-9	1,64E-5
	TubAposPSVs	pequeno vazamento	3,84E-7	9,37E-4

Tabela 16 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da RB de estocagem

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande	VasoEstocagem	grande vazamento	1,00E-4	8,31E-1
	VazamentoExterno_VG14	grande vazamento	2,03E-5	1,69E-1
médio	VasoEstocagem	médio vazamento	9,48E-6	3,50E-2
	VazamentoExterno_VG14	médio vazamento	2,21E-4	8,16E-1
	VazamentoExterno_VG13	médio vazamento	4,03E-5	1,49E-1
pequeno vazamento	VasoEstocagem	pequeno vazamento	3,79E-5	6,09E-2
	VazamentoExterno_VG14	pequeno vazamento	5,36E-4	8,60E-1
	VazamentoExterno_VG13	pequeno vazamento	4,91E-5	7,88E-2

Tabela 17 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da RB de estocagem

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande	VasoEstocagem	grande vazamento	1,00E-4	7,11E-1
	ValvsAtuadas_AmoniaGasosa	grande vazamento	4,05E-5	2,88E-1
	TubAntesPSVs	grande vazamento	2,31E-7	1,64E-3
médio	ValvsManuais_AmoniaGasosa	médio vazamento	1,21E-4	1,79E-1
	ValvsAtuadas_AmoniaGasosa	médio vazamento	4,41E-4	6,52E-1
	VazamentoExterno_VG11	médio vazamento	1,18E-6	1,75E-3
	TubAntesPSVs	médio vazamento	3,82E-7	5,65E-4
	TubAposPSVs	médio vazamento	1,03E-4	1,53E-1
	VasoEstocagem	médio vazamento	9,48E-6	1,40E-2
	ValvulasManuais_AmoniaGasosa	pequeno vazamento	1,47E-4	1,13E-1
pequeno	ValvsAtuadas_AmoniaGasosa	pequeno vazamento	1,07E-3	8,21E-1
	VazamentoExterno_VG11	pequeno vazamento	5,54E-7	4,25E-4
	TubAntesPSVs	pequeno vazamento	2,74E-6	2,10E-3
	TubAposPSVs	pequeno vazamento	4,52E-5	3,47E-2
	VasoEstocagem	pequeno vazamento	3,79E-5	2,91E-2

Tabela 18 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaLiquida” da RB de distribuição

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande vazamento	TubAntesEvaporador	grande vazamento	1,96E-5	9,19E-1
	VasoEstocagem	grande vazamento	7,03E-7	3,30E-2
	VazamentoExterno_VG14	grande vazamento	1,02E-6	4,77E-2
médio vazamento	TubAntesEvaporador	médio vazamento	2,41E-5	6,40E-1
	VasoEstocagem	médio vazamento	5,02E-7	1,33E-2
	VazamentoExterno_VG13	médio vazamento	2,13E-6	5,64E-2
	VazamentoExterno_VG14	médio vazamento	1,11E-5	2,93E-1
pequeno vazamento	TubAntesEvaporador	pequeno vazamento	2,76E-5	4,62E-1
	VasoEstocagem	pequeno vazamento	2,01E-6	3,36E-2
	VazamentoExterno_VG13	pequeno vazamento	2,60E-6	4,35E-2
	VazamentoExterno_VG14	pequeno vazamento	2,76E-5	4,61E-1

Tabela 19 – Diagnóstico dada evidência no nó “VazamentoAmoniaGasosa” da RB de distribuição

Evidência	Nó	Estado de interesse	Valor de probabilidade original	Valor com evidência
grande vazamento	VasoEstocagem	grande vazamento	7,03E-7	6,39E-3
	TubAposEvaporador	grande vazamento	9,80E-5	8,91E-1
	VazamentoValvs_Gasosa	grande vazamento	1,13E-5	1,03E-1
médio vazamento	VasoEstocagem	médio vazamento	5,02E-7	2,84E-3
	TubAposEvaporador	médio vazamento	1,21E-4	6,81E-1
	VazamentoValvs_Gasosa	médio vazamento	5,59E-5	3,16E-1
pequeno vazamento	VasoEstocagem	pequeno vazamento	2,01E-6	8,23E-3
	TubAposEvaporador	pequeno vazamento	1,38E-4	5,65E-1
	VazamentoValvs_Gasosa	pequeno vazamento	1,04E-4	4,27E-1

Como pode se observar, na RB de abastecimento a causa mais provável de um grande ou médio vazamento, seja de amônia líquida ou gasosa, está associada aos mangotes flexíveis; já os pequenos vazamentos têm como causa mais provável um vazamento pelas válvulas atuadas ou pela tubulação, no caso de amônia líquida, e um vazamento pelo vaso pulmão ou pelo compressor, para amônia gasosa. Na RB de estocagem, um grande vazamento, tanto de amônia líquida quanto de amônia gasosa, possui como causa mais provável um vazamento pelo vaso de estocagem; médios e pequenos vazamentos de amônia líquida possuem como causa mais provável um vazamento pela VG14, enquanto que os médios e pequenos vazamentos de amônia gasosa têm como causa mais provável vazamento em uma das válvulas atuadas. Já na RB de distribuição a causa mais provável de um vazamento de amônia líquida, para grandes e médios vazamentos, é uma liberação pela tubulação localizada antes do evaporador, enquanto que para pequenos vazamentos a causa mais provável encontra-se, além dessa tubulação, na válvula VG14; já um vazamento de amônia gasosa possui como causas mais prováveis, para grandes e médios vazamentos, uma liberação pela tubulação que fica após o evaporador, enquanto que um pequeno vazamento tem como causa mais provável essa tubulação ou por uma das válvulas por onde a amônia gasosa é transferida.

5.4 Estimativa das consequências

Para a estimativa das consequências dos possíveis cenários acidentais, foram utilizados os modelos matemáticos propostos na Seção 4.4 – através da utilização do software *Phast Risk* (DNV-GL, 2010). A concentração foi calculada a uma altura de 1,5 m do nível do solo, e as condições climáticas do entorno (obtidas de uma estação meteorológica particular localizada no município de Iperó/SP) utilizadas na modelagem são as apresentadas na Tabela 20. Para todos os cenários foi considerado, conservadoramente, que não há a possibilidade de interrupção do vazamento.

Tabela 20 – Dados climáticos adotados

Dados climáticos	Dia de verão	Noite de verão	Dia de inverno	Noite de inverno
Temperatura	24,7 °C	19,9 °C	20,5 °C	15,2 °C
Umidade	63,3%	78,9%	75,5%	71,0%
Velocidade do vento	2,20 m/s	1,53 m/s	1,94 m/s	1,16 m/s
Classe de estabilidade atmosférica	D	E	D	G

5.4.1 Formação de poça

Nos cenários com vazamento de amônia líquida, a formação da poça modelada apresentou os resultados mostrados na Tabela 21, sendo apresentados o raio máximo atingido pela poça, o tempo decorrido para a poça atingir tal raio, e parcela do inventário total que precipitou na forma líquida e compõe a poça. Para os cenários onde o raio máximo da poça apresentado é de 3,95 metros, a modelagem indica que foi atingida a área total da bacia de contenção.

Tabela 21 – Resultados de formação de poça

Tamanho do vazamento	Condição climática	Raio máximo da poça	Tempo para atingir o raio máximo	Parcela do inventário vazado na poça
Grande	Dia de verão	3,95 m	6,5 s	74,7%
	Noite de verão	3,95 m	6,5 s	74,7%
	Dia de inverno	3,95 m	6,5 s	74,7%
	Noite de inverno	3,95 m	6,5 s	75,0%
Médio	Dia de verão	3,95 m	118,8 s	60,7%
	Noite de verão	3,95 m	115,0 s	60,9%
	Dia de inverno	3,95 m	116,1 s	61,0%
	Noite de inverno	3,95 m	109,7 s	61,9%
Pequeno	Dia de verão	0,39 m	2212,7 s	16,4%
	Noite de verão	0,42 m	2555,1 s	16,6%
	Dia de inverno	0,41 m	3055,6 s	17,2%
	Noite de inverno	0,51 m	3473,0 s	19,6%

5.4.2 Dispersão de nuvem

A modelagem da dispersão da nuvem de amônia formada, realizada conforme apresentado no item 4.4.2, obteve como resultados níveis de concentração em função da distância do ponto de liberação.

Com essa informação, e considerando-se a possibilidade de ocorrência de um incêndio em nuvem, adota-se que a probabilidade de fatalidade de um indivíduo é de 100% caso ele esteja internamente à nuvem quando da sua ignição e 0% caso ele esteja localizado externamente aos limites da nuvem. Nessa situação, também é considerado, conservadoramente, que a nuvem poderia sofrer ignição após se dispersar até a metade do limite inferior de inflamabilidade (LII) do material, o que representa 8% de concentração no ar para a amônia. As máximas distâncias em relação ao ponto de liberação onde esta condição é atingida, para cada um dos cenários, são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados de incêndio em nuvem

Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Condição climática	Máxima distância para a nuvem atingir 50% do LII
Líquido	Grande	Dia de verão	31,92 m
		Noite de verão	32,69 m
		Dia de inverno	31,29 m
		Noite de inverno	38,45 m
	Médio	Dia de verão	6,87 m
		Noite de verão	6,68 m
		Dia de inverno	6,69 m
		Noite de inverno	5,73 m
	Pequeno	Dia de verão	2,17 m
		Noite de verão	2,21 m
		Dia de inverno	2,17 m
		Noite de inverno	2,26 m
Gasoso	Grande	Dia de verão	11,59 m
		Noite de verão	11,69 m
		Dia de inverno	11,57 m
		Noite de inverno	11,81 m
	Médio	Dia de verão	2,00 m
		Noite de verão	1,99 m
		Dia de inverno	1,98 m
		Noite de inverno	1,99 m
	Pequeno	Dia de verão	0,41 m
		Noite de verão	0,40 m
		Dia de inverno	0,40 m
		Noite de inverno	0,40 m

5.4.3 Toxicidade

Com as concentrações de amônia no ar calculadas, foram então obtidas as probabilidades de fatalidade em função da toxicidade da amônia, conforme apresentado no item 3.4.3, calculadas a uma altura de 1,5 m do solo.

A distância em relação ao ponto de liberação onde é atingida a probabilidade de morte de 1%, calculada conforme indicado em 3.4.3, para cada cenário avaliado, é apresentada na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados de toxicidade

Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Condição climática	Distância para 1% de probabilidade de morte
Líquido	Grande	Dia de verão	305,1 m
		Noite de verão	305,0 m
		Dia de inverno	292,3 m
		Noite de inverno	488,6 m
	Médio	Dia de verão	209,5 m
		Noite de verão	228,9 m
		Dia de inverno	219,6 m
		Noite de inverno	274,0 m
	Pequeno	Dia de verão	53,7 m
		Noite de verão	62,2 m
		Dia de inverno	57,3 m
		Noite de inverno	60,9 m
Gasoso	Grande	Dia de verão	238,3 m
		Noite de verão	209,9 m
		Dia de inverno	221,1 m
		Noite de inverno	191,1 m
	Médio	Dia de verão	78,8 m
		Noite de verão	78,7 m
		Dia de inverno	77,3 m
		Noite de inverno	73,0 m
	Pequeno	Dia de verão	7,1 m
		Noite de verão	9,2 m
		Dia de inverno	7,6 m
		Noite de inverno	10,0 m

5.4.4 Sobrepressão

Para a utilização do modelo *Multi-Energy* para a modelagem dos efeitos de sobrepressão, foi adotado, seguindo critério apresentado por Raman e Grillo (2005),

o grau de confinamento 3 para a área do local onde se situa o vaso de estocagem de amônia analisado, uma vez que este se encontra em área externa com baixo congestionamento de equipamentos ao redor. O modelo não obteve nenhum resultado de explosão, e, conseqüentemente, nenhuma sobrepressão foi estimada. Da mesma maneira, não foi identificada a possibilidade de ocorrência de um BLEVE entre os cenários analisados, não sendo obtidos, portanto, valores de sobrepressão pelo modelo de Baker et al. indicado na Seção 4.4.4.

5.4.5 Radiação térmica

Para as modelagens que apresentam resultados de radiação térmica foram adotados como critério comparativo níveis de radiação de referência de 4 kW/m², 12,5 kW/m² e 35 kW/m², que são equivalentes a probabilidades de morte de 1%, 50% e 100% (Cetesb, 2011), respectivamente, para pessoas expostas.

5.4.5.1 Jato de fogo

Com a modelagem de um possível jato de fogo para os cenários analisados, adotando-se os modelos propostos na Seção 4.4.5 para as diferentes formas de um jato de fogo, foram obtidas as máximas distâncias em relação ao ponto de liberação onde são atingidos os níveis de radiação de interesse. Essas distâncias estão apresentadas na Tabela 24.

Tabela 24 – Distâncias para níveis de radiação devido a jato de fogo

Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Condição climática	Nível de radiação	Máxima distância
Líquido	Grande	Dia de verão	4,0 kW/m ²	181,65 m
			12,5 kW/m ²	157,22 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
		Noite de verão	4,0 kW/m ²	193,15 m
			12,5 kW/m ²	168,24 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
		Dia de inverno	4,0 kW/m ²	185,65 m
			12,5 kW/m ²	161,10 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
		Noite de inverno	4,0 kW/m ²	200,92 m
			12,5 kW/m ²	175,30 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
	Médio	Dia de verão	4,0 kW/m ²	41,82 m

Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Condição climática	Nível de radiação	Máxima distância
Gasoso	Pequeno	Noite de verão	12,5 kW/m ²	36,03 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	44,61 m
		Dia de inverno	12,5 kW/m ²	38,45 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	42,83 m
		Noite de inverno	12,5 kW/m ²	36,92 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	46,62 m
		Dia de verão	12,5 kW/m ²	40,02 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	9,77 m
	Grande	Noite de verão	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	10,44 m
		Dia de inverno	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	10,01 m
		Noite de inverno	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	10,91 m
		Dia de verão	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	55,26 m
Gasoso	Médio	Noite de verão	12,5 kW/m ²	48,13 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	59,03 m
		Dia de inverno	12,5 kW/m ²	51,51 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	56,62 m
		Noite de inverno	12,5 kW/m ²	49,36 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	61,72 m
		Dia de verão	12,5 kW/m ²	53,91 m
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	8,96 m
	Pequeno	Noite de verão	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	9,76 m
		Dia de inverno	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	9,25 m
		Noite de inverno	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	10,30 m
		Dia de verão	12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
			4,0 kW/m ²	Não atingido

Tipo de vazamento	Tamanho do vazamento	Condição climática	Nível de radiação	Máxima distância
	Noite de verão		4,0 kW/m ²	Não atingido
			12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
	Dia de inverno		4,0 kW/m ²	Não atingido
			12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de inverno		4,0 kW/m ²	Não atingido
			12,5 kW/m ²	Não atingido
			35,0 kW/m ²	Não atingido

Como pode se observar, o nível de radiação de 35 kW/m² não é atingido em nenhum dos cenários analisados. Isso se deve ao fato do calor de combustão da amônia ser relativamente baixo – 316,8 kJ/mol, conforme indicam Witlox, Fernandez e Stene (2011) – o que confere à substância um baixo poder emissivo de chama, ou seja, apesar da existência do incêndio, os níveis de radiação térmica emitidos por este não são altos, não atingindo o nível de radiação de referência. Além disso, o cálculo do poder emissivo da chama também leva em consideração a quantidade de material disponível para queima, o que explica o fato de valores de radiação térmica mais baixos (12,5 kW/m² ou 4,0 kW/m²) não serem atingidos em cenários de menor vazamento.

5.4.5.2 Incêndio em poça

Nos cenários com vazamento de amônia líquida, o possível incêndio da poça formada foi modelado, considerando a possibilidade de uma ocorrência de ignição imediata (onde o modelo considera o diâmetro da poça como sendo aquele observado no instante em que a quantidade de material sendo acrescido à poça pelo vazamento é igual à quantidade de material queimada pelo incêndio) ou retardada (onde o modelo considera o diâmetro máximo da poça). Para ambos os cenários analisados, a ignição ocorre com o mesmo diâmetro de poça e, portanto, os efeitos obtidos em termos de radiação térmica em função da distância foram os mesmos, e estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Distâncias para níveis de radiação devido à incêndio em poça

Tamanho do vazamento	Condição climática	Nível de radiação	Máxima distância
Grande	Dia de verão	4,0 kW/m ²	11,00 m
		12,5 kW/m ²	5,62 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de verão	4,0 kW/m ²	10,74 m
		12,5 kW/m ²	5,34 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Dia de inverno	4,0 kW/m ²	10,92 m
		12,5 kW/m ²	5,55 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de inverno	4,0 kW/m ²	10,57 m
		12,5 kW/m ²	5,21 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
Médio	Dia de verão	4,0 kW/m ²	11,00 m
		12,5 kW/m ²	5,62 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de verão	4,0 kW/m ²	10,74 m
		12,5 kW/m ²	5,34 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Dia de inverno	4,0 kW/m ²	10,92 m
		12,5 kW/m ²	5,55 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de inverno	4,0 kW/m ²	10,57 m
		12,5 kW/m ²	5,21 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
Pequeno	Dia de verão	4,0 kW/m ²	4,95 m
		12,5 kW/m ²	4,95 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de verão	4,0 kW/m ²	4,95 m
		12,5 kW/m ²	4,95 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Dia de inverno	4,0 kW/m ²	4,95 m
		12,5 kW/m ²	4,95 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido
	Noite de inverno	4,0 kW/m ²	5,01 m
		12,5 kW/m ²	4,95 m
		35,0 kW/m ²	Não atingido

5.4.5.3 Bola de fogo

O modelo proposto em 4.4.5 foi aplicado, com o auxílio do software *Phast Risk*, nos cenários analisados. Porém, para esses cenários, não foram obtidos resultados para a eventual ocorrência de uma bola de fogo. Dessa forma, não há distâncias para níveis de radiação de referência a serem apresentadas.

5.5 Cálculo de risco

Para o cálculo do risco foram levantadas as probabilidade de ocorrência de vento em cada direção em cada direção para a região do estudo de caso, obtidos da mesma estação meteorológica citada na seção 5.4. Esses dados estão apresentados na Tabela 26, separados em 16 direções de vento.

Tabela 26 – Probabilidades de direção de vento

Direção do vento	Dia de verão	Noite de verão	Dia de inverno	Noite de inverno
N	11,42%	2,76%	8,16%	1,96%
NNE	11,57%	2,98%	10,42%	1,74%
NE	4,95%	1,38%	4,69%	1,11%
NEE	2,80%	1,06%	3,23%	1,41%
E	2,66%	1,26%	3,77%	1,42%
ESE	6,05%	2,78%	7,73%	1,91%
SE	11,49%	17,59%	11,50%	13,03%
SES	12,08%	27,14%	11,02%	22,90%
S	9,72%	17,38%	8,57%	20,80%
SSO	3,58%	12,38%	5,14%	17,72%
SO	2,32%	5,32%	2,71%	3,51%
SOO	2,39%	1,95%	3,46%	3,76%
O	2,34%	1,38%	3,45%	4,08%
ONO	3,76%	1,51%	4,17%	2,02%
NO	6,36%	1,41%	6,61%	1,43%
NON	6,32%	1,72%	5,38%	1,19%
Total	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Para a quantificação do risco social, foi estimada a distribuição populacional das instalações localizadas no entorno da planta objeto desta análise. O número de pessoas aproximado, dividido em população diurna e população noturna, para cada instalação, está apresentado na Tabela 27. Por tratar-se de uma região predominantemente industrial, não foram identificadas no entorno áreas residenciais ou comerciais.

Tabela 27 – Distribuição populacional do entorno por período

Local	Quantidade de pessoas	Quantidade de pessoas
	(dia)	(noite)
Instalação 1	280	110
Instalação 2	65	15
Instalação 3	80	30
Instalação 4	100	20
Instalação 5	30	5
Instalação 6	50	10
Instalação 7	200	50
Instalação 8	180	30

Assim, combinou-se o conjunto de dados obtidos na quantificação da frequência de ocorrência dos eventos, suas consequências, possíveis condições climáticas e distribuição populacional do entorno, de forma a se obter o risco associado à utilização de amônia na instalação de interesse.

O risco individual calculado está apresentado na Figura 12. As curvas de isorisco de 10^{-6} a 10^{-9} ano^{-1} são apresentadas coloridas no mapa, sendo a área hachurada em azul o local da instalação.

O risco social calculado está apresentado na Figura 13. As retas em vermelho e amarelo representam os critérios de tolerabilidade, conforme apresentado em Cetesb (2011), enquanto que a curva em azul representa o risco social calculado para a instalação objeto de estudo deste trabalho.

Figura 12 – Risco individual

Figura 13 – Risco social

5.6 Avaliação dos resultados

Conforme se pode observar na Figura 12 e na Figura 13, o risco devido à utilização de amônia na instalação foco deste estudo encontra-se dentro de padrões aceitáveis, fazendo-se o comparativo com os padrões estabelecidos pela Cetesb (2011).

Porém, mesmo em casos como este, medidas para a redução do risco poderiam ser adotadas. Uma comparação do quão impactante seria a adoção de determinadas medidas protetivas no sistema poderá ser um tema de trabalhos futuros.

Adicionalmente aos valores de risco, com o auxílio do software *Phast Risk* pôde-se identificar quais os cenários que mais contribuem para o risco da instalação analisada. Os principais cenários e suas respectivas parcelas de contribuição estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 – Maiores contribuidores para o risco

Processo	Cenário	Contribuição para o risco
Estocagem	Vazamento líquido – médio	70,47%
Estocagem	Vazamento líquido – grande	15,88%
Estocagem	Vazamento gasoso – grande	7,92%
Abastecimento	Vazamento líquido – médio	1,61%
Abastecimento	Vazamento líquido – grande	1,33%
	Outros	2,79%

Como se pode observar, o processo de estocagem é o que apresenta os cenários com a maior contribuição para o risco da planta – fato que está diretamente relacionado ao tempo de duração do processo, muito maior que o tempo dos processos de abastecimento e distribuição da amônia. Dessa forma, melhorias nas condições de estocagem poderiam contribuir mais significativamente para a redução do risco da planta.

6 Conclusões

O presente trabalho teve como foco a proposição de uma metodologia para a avaliação dos riscos devido à utilização de amônia em uma instalação de produção de hexafluoreto de urânio. Identificou-se, portanto, com a aplicação da metodologia proposta num estudo de caso real, que essa metodologia atende os objetivos de cálculo dos riscos individual e social para esse tipo de instalação, trazendo uma boa qualidade de informação relacionada a causas mais prováveis de ocorrência de vazamentos, aos principais efeitos e aos cenários que mais contribuem para o risco da instalação. Tais informações são valiosas na identificação de itens ou sistemas mais críticos para o risco da instalação. Vale ressaltar que trabalhos futuros poderão ser realizados para se avaliar a sensibilidade da planta à variação de taxas de falhas de componentes – o que pode indicar para quais itens do sistema tais dados precisam apresentar maior acurácia – ou o impacto da utilização de modelos matemáticos mais sofisticados para a análise das consequências e para os resultados de risco.

É possível se inferir também que a metodologia poderia ser extrapolada para o cálculo do risco em outros tipos de indústrias que armazenem inventários de amônia ou outras substâncias químicas semelhantes.

Para a planta industrial analisada, foi possível observar que o risco encontra-se dentro de limites aceitáveis para critérios de licenciamento, além de serem identificado itens onde uma ação de proteção poderia causar gerar redução do risco da instalação.

REFERÊNCIAS

AMERICAN BUREAU OF SHIPPING (ABS). **Guide for risk evaluations for the classification of marine-related facilities**. Houston, 2003.

ANJANA, N. S.; AMARNATH, A.; HARINDRANATHAN NAIR, M. V. Toxic hazards of ammonia release and population vulnerability assessment using geographical information system. **Journal of Environmental Management**, p. 201-209, 2018.

BOBBIO, A. et al. Improving the analysis of dependable systems by mapping fault trees into Bayesian networks. **Reliability Engineering and System Safety**. Oxford, p. 249-260, 2001.

BRITTER, R. E.; MCQUAID, J. **Workbook on the dispersion of dense gases**, HSE contract Research Report No. 17, 1988.

CANU, I. G. et al. Comparative assessing for radiological, chemical, and physical exposures at the French uranium conversion plant: Is uranium the only stressor?. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, p. 398-413, 2009.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS). **Guidelines for Chemical Process Quantitative Risk Analysis**. 2. ed. Nova York, 1999.

CENTER FOR CHEMICAL PROCESS SAFETY (CCPS). **Guidelines for Process Equipment Reliability Data**. Nova York, 1989.

CHAMBERLAIN, G. A. Developments in design methods for predicting thermal radiation from flares. **Chemical Engineering Research & Design**. Amsterdam, p. 299-309, 1987.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR (CNEN). Norma CNEN NE 1.04: **Licenciamento de Instalações Nucleares**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2002.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Norma Técnica P4.261: **Risco de Acidente de Origem Tecnológica – Métodos para Decisão e Termos de Referência**. 2. ed. São Paulo, 2011.

DET NORSKE VERITAS (DNV). **Failure Frequency Guidance: Process Equipment Leak Frequency Data for Use in QRA**. Noruega, 2013.

DET NORSKE VERITAS GERMANISCHER LLOYD (DNV-GL). **Phast Risk**. Versão 6.7. 2010.

DEUBLEIN, M. et al. Prediction of road accidents: A Bayesian hierarchical approach. **Accident Analysis and Prevention**, p. 274-291, 2012.

FIRMINO, P. R. A. **Redes Bayesianas para a parametrização da confiabilidade em sistemas complexos**. 80 f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

HADDAD, J. et al. Major Hazard Risk Assessment on Ammonia Storage at Jordan Phosphate Mines Company (JPMC) in Aqaba, Jordan. **4th International Conference on Safety & Environment in Process Industry**, p. 359-364, 2010.

HADDAD, T.; HIMES, A.; CAMPBELL, M. Fracture prediction of cardiac lead medical devices using Bayesian networks. **Reliability Engineering and System Safety**, p. 145-157, 2013.

HARPER, H. **UDM Theory Document**. Londres: DNV Report, 2009.

HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). **Failure Rate and Event Data for use within Risk Assessments**. Londres, 2012.

INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION (IMO). **Guidelines for Formal Safety Assessment for use in the IMO rule-making process**. Maritime Safety Committee and Marine Environment Protection. Londres, 2002.

JERONIMO, A. C. **Metodologia para a Prevenção de Riscos Ocupacionais nos Processos da Conversão do Urânio**. 141 f. Tese (Doutorado). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.

KECECIOGLU, D. **Reliability Engineering Handbook**. Lancaster: DEStech Publications, 2002.

KUMAMOTO, H.; HENLEY, E. J. **Probabilistic Risk Assessment and Management for Engineers and Scientists**. 2. ed. Nova York; IEEE Press, 1996.

LANGSETH, H.; PORTINALE, L. Bayesian networks in reliability. **Reliability Engineering and System Safety**. Oxford, p. 92-108, 2005.

MAHADEVAN, S.; ZHANG, R.; SMITH, N. Bayesian networks for system reliability reassessment. **Structural Safety**. Amsterdam, p. 231-251, 2001.

MANNAN, S. (Ed.). **Less' Loss Prevention in the Process Industries: Hazard Identification, Assessment and Control**. 3. ed. Texas: Elsevier, 2005.

MARTINS, M. R. **Considerações sobre análise de confiabilidade e risco**. 868f. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MARTINS, M. R.; GOYANO, F. H. T. C.. Preliminary Hazard Analysis of Fire Systems of Tankers. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 17. **Proceedings**. Lisboa: International Society of Offshore and Polar Engineers, 2007.

MARTINS, M. R.; NATACCI, F. B. Reliability analysis of a rotary vane type steering gear system. In: INTERNATIONAL OFFSHORE AND POLAR ENGINEERING CONFERENCE, 18., 2008. **Proceedings**. Vancouver: The International Society Of Offshore And Polar Engineers, 2008. p. 478 - 483.

MATURANA, M. C. **Aplicação de Redes Bayesianas na análise da contribuição da falha humana em acidentes de colisão**. 141 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MEDEIROS, V. S.; MARTINS, M. R. Methodology for Risk Analysis of an Ammonia Tank Refueling Process in a Uranium Hexafluoride Facility using Bayesian Networks. In: CONGRESSO ABRISCO2015PSAM. **Resumos**. Rio de Janeiro, 2015, p. 12.

MIZUTA, Y.; NAKAGAWA, M. Development of Quantitative Hazard Analysis Method for Inherently Safer Chemical Processes. **Chemical Engineering Transactions**, p. 247-252, 2013.

MODARRES, M.; KAMINSKIY, M.; KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide**. Nova York: Marcel Dekker, 1999.

MOHSENDOKHT, M. Risk Assessment of uranium hexafluoride release from a uranium conversion facility by using a fuzzy approach. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, p. 217-228, 2017.

NIELSEN, M. et al. Field experiments with dispersion of pressure liquefied ammonia. **Journal of Hazardous Materials**, p. 59-105, 1997.

NORSYS SOFTWARE CORPORATION. **Netica**. Versão 5.12. 2013.

OKE, A. O. **BLEVE (Fireball) Theory Document**, Londres: DNV Report, 2004.

OKE, A. O. **JFSH (Jet fire) Theory Document**, Londres: DNV Report, 2005.

RAMAN, R.; GRILLO, P. Minimizing Uncertainty in Vapour Cloud Explosion Modelling. **Process Safety and Environmental Protection**. Glasgow, p. 298-306, 2005.

RELIABILITY INFORMATION ANALYSIS CENTER (RIAC). **Noneletronic Parts Reliability Data**. 2011.

ROY, P. K. et al. Consequence and risk assessment: Case study of an ammonia storage facility. **Archives of Environmental Science**, p. 25-36, 2011.

SANTOS, F. C.; GONÇALVES, J. S.; MEDEIROS, J. A. C. C.; FRUTUOSO E MELO, P. F. A method for the identification of a set of critical safety functions for a uranium hexafluoride conversion plant. **Annals of Nuclear Energy**, p. 165-175, 2016.

SCHLEDER, A. M. **Aplicação de redes Bayesianas para a análise de confiabilidade do sistema de regaseificação de uma unidade tipo FSRU**. 115 f. Dissertação (Mestrado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

SCHLEDER, A. M. **Quantitative dispersion analysis of leakages of flammable and/or toxic substances on environments with barriers or semi-confined**. 187 f. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SCHLEDER, A. M.; MARTINS, M. R.; SOUZA, G. F. M. Bayesian networks on risk analysis of a regasification system on an offshore unit. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON OCEAN, OFFSHORE AND ARCTIC ENGINEERING, 30., 2011, Rotterdam. **Proceedings**. Rotterdam: Asme, 2011.

SONG, B.; LEE, C.; PARK, Y. **Assessing the risk of service failures based on ripple effects: A Bayesian network approach**. International Journal of Production Economics, p. 493-504, 2011.

SPOUGE, J. **A guide to quantitative risk assessment for offshore installations**, CMPT, 1999.

SUNG, H. M.; WHEELER, J. G. Source Characterization of Ammonia Accidental Releases for Various Storage and Process Conditions. **Air & Waste Management Association's 90th Annual Meeting & Exhibition**, 1997.

THE NETHERLANDS ORGANIZATION OF APPLIED SCIENTIFIC RESEARCH (TNO). **Methods for the calculation of physical effects (Yellow Book)**, 2005.

TSOULFANIDIS, N. **The Nuclear Fuel Cycle**. Illinois: American Nuclear Society, 2012.

U. S. MIL-STD-1629A – Military Standard. **Procedures for performing a Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis**. Washington, D. C. 1980.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). NUREG-0492. **Fault Tree Handbook**. Washington, D. C., 1981.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). NUREG-2300. **PRA Procedures Guide**. Washington, D. C., 1983.

UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION (USNRC). NUREG/CR-1278. **Handbook of Human Reliability Analysis with Emphasis on Nuclear Power Plant Applications**. Washington, D. C., 1983.

WITLOX, H. **PVAP Theory Document**. Londres: DNV Report, 2006.

WITLOX, H. **POLF (Pool Fire) Theory Document**. Londres: DNV Report, 2005.

WITLOX, H.; FERNANDEZ, M.; STENE, J. **Property Database Document**, Londres: DNV Report, 2011.

APÊNDICE A – Análise Preliminar de Perigos

Processo	Perigo	Potenciais causas	Consequências	Avaliação da probabilidade de ocorrência	Avaliação do Impacto	Risco	Classificação
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha no corpo do vaso de estocagem	- Corrosão - Impacto - Sobrepressão	Liberação de amônia líquida e/ou gasosa	4	1	II	Indesejável
Abastecimento do vaso de estocagem	Aumento de pressão no vaso de estocagem	- Válvula VG3 fechada - Erro de operador	Abertura da PSV1 e PSV2	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) no mangote FLEX1	- Corrosão - Impacto - Erro de conexão	Liberação de amônia líquida	3	1	I	Inaceitável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (entupimento) no mangote FLEX1	- Válvula VG16 fechada - Presença de objeto no interior do mangote	Não transferência de amônia do caminhão para o vaso de estocagem	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha na tubulação entre o FLEX1 e o vaso de estocagem	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia líquida	4	1	II	Indesejável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (fechada) da VG1, VG2, VG16 ou VR1	- Defeito - Erro do operador	Não transferência de amônia do caminhão para o vaso de estocagem	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) da VG1, VG2, VG16 ou VR1	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia líquida	4	2	III	Tolerável com controles

Abastecimento do vaso de estocagem	Falha na tubulação entre o vaso de estocagem e o FLEX2	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	4	2	III	Tolerável com controles
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (fechada) da VG3, VG4, VG5, VG6 ou VG15	- Defeito - Erro do operador	Não transferência de amônia do caminhão para o vaso de estocagem	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) da VG3, VG4, VG5, VG6 ou VG15	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	4	3	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (parado) do compressor	- Falha mecânica - Ausência de energia elétrica	Não transferência de amônia do caminhão para o vaso de estocagem	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) do compressor	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	4	3	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) no mangote FLEX2	- Corrosão - Impacto - Erro de conexão	Liberação de amônia gasosa	4	2	III	Tolerável com controles
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (entupimento) no mangote FLEX2	- Válvula VG15 fechada - Presença de objeto no interior do mangote	Não transferência de amônia do caminhão para o vaso de estocagem	3	4	IV	Tolerável
Abastecimento do vaso de estocagem	Falha (vazamento externo) no vaso pulmão	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	4	3	IV	Tolerável

Abastecimento do vaso de estocagem	Aumento de pressão no vaso pulmão	- Válvulas VG5, VG6 ou VG15 fechadas	Abertura da PSV3	4	4	IV	Tolerável
Estocagem de amônia	Falha no corpo do vaso de estocagem	- Corrosão - Impacto - Sobrepressão	Liberação de amônia líquida e/ou gasosa	4	1	II	Indesejável
Estocagem de amônia	Falha (vazamento externo) na PSV1, PSV2, VG9, VG10 ou VG12	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	3	3	III	Tolerável com controles
Estocagem de amônia	Falha (vazamento externo) na VG13	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia líquida	3	2	II	Indesejável
Distribuição para o processo	Falha (fechada) da VG14 ou VG17	- Defeito - Erro do operador	Não distribuição de amônia para o processo	3	4	IV	Tolerável
Distribuição para o processo	Falha (vazamento externo) da VG14	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia líquida	3	2	II	Indesejável
Distribuição para o processo	Falha (vazamento externo) da VG17	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	3	3	III	Tolerável com controles
Distribuição para o processo	Funcionamento ineficiente do evaporador	- Falha mecânica	Transferência de amônia em condições inadequadas para o processo	4	4	IV	Tolerável
Distribuição para o processo	Falha na tubulação entre o vaso de estocagem e o evaporador	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia líquida	3	2	II	Indesejável

Distribuição para o processo	Falha na tubulação entre o evaporador e a unidade de processo	- Corrosão - Impacto	Liberação de amônia gasosa	3	3	III	Tolerável com controles
------------------------------	---	-------------------------	----------------------------	---	---	-----	-------------------------

APÊNDICE B – Tabelas de Probabilidades Condicionais

RB de abastecimento

Para o nó “VazamentoAmoniaLiquida” foi considerado o estado “grande” quando houve a ocorrência do estado de grande vazamento nos nós “VasoEstocagem”, “ValvsAtuadas_AmoniaLiquida”, “ValvManual_AmoniaLiquida”, “Tub_AmoniaLiquida” ou “VR1”, ou ainda quando ocorreu o estado de vazamento para o nó “MangoteFLEX1”. No caso de nenhum desses estados ocorrer, foi considerado o estado “médio” para o nó “VazamentoAmoniaLiquida” quando ocorria o estado de médio vazamento nos nós “VasoEstocagem”, “ValvsAtuadas_AmoniaLiquida”, “ValvManual_AmoniaLiquida”, “Tub_AmoniaLiquida” ou “VR1”, ou o estado de erro de conexão para o nó “MangoteFLEX1”. Se nenhum desses estados ocorresse, foi considerado o estado “pequeno” para o nó “VazamentoAmoniaLiquida” quando ocorria o estado de pequeno vazamento nos nós “VasoEstocagem”, “ValvsAtuadas_AmoniaLiquida”, “ValvManual_AmoniaLiquida”, “Tub_AmoniaLiquida” ou “VR1”. No caso de nenhum dos estados citados ser verificado, foi considerado o estado “sem vazamento” para o nó “VazamentoAmoniaLiquida”. Um trecho exemplificativo da TPC desse nó é apresentado a seguir:

[illegible]

Para o nó “VazamentoAmoniaGasosa” foi considerado o estado “grande” no caso de o estado “grande vazamento” ocorrer em ao menos um dos nós “ValvsManuais_AmoniaGasosa”, “ValvsAtuadas_AmoniaGasosa”, “Compressor”, “Tub_AmoniaGasosa”, “TubAposPSVs”, “VazamentoExterno_VG11” ou “VasoPulmao”, ou ainda se o estado do nó “MangoteFLEX2” for vazamento. Se tais estados não ocorrerem, foi considerado o estado “médio” para o nó “VazamentoAmoniaGasosa” no caso de o estado “médio vazamento” ocorrer em ao menos um dos nós “Tub_AmoniaGasosa”, “ValvsManuais_AmoniaGasosa”, “ValvsAtuadas_AmoniaGasosa”, “Compressor”, “TubAposPSVs”, “VasoPulmao” ou “VazamentoExterno_VG11”, ou ainda se o estado do nó “MangoteFLEX2” for “erro de conexão”. Caso essas condições não sejam atendidas, considerou-se o estado “pequeno” para o nó “VazamentoAmoniaGasosa” no caso de o estado “pequeno vazamento” ocorrer em ao menos um dos nós “ValvsManuais_AmoniaGasosa”, “ValvsAtuadas_AmoniaGasosa”, “Compressor”, “Tub_AmoniaGasosa”, “TubAposPSVs”, “VazamentoExterno_VG11” ou “VasoPulmao”. No caso de nenhum dos estados citados ser verificado, foi considerado o estado “sem vazamento” para o nó “VazamentoAmoniaGasosa”. Um trecho exemplificativo da TPC desse nó é apresentado a seguir:

[illegible]

Para o nó “VasoEstocagem”, considerou-se que o estado “grande vazamento” se dá no caso de ocorrência do estado “ocorre” no nó “VazamentoAltaPressao_VE”. Caso esse nó apresente o estado “não ocorre”, o estado do nó “VasoEstocagem” terá o mesmo estado do nó “FalhaVasoEstocagem”. A TPC do nó “VasoEstocagem” é apresentada a seguir:

VasoEstocagem	VazamentoAltaPressao_VE	FalhaVasoEstocagem
grande vazamento	ocorre	grande vazamento
grande vazamento	ocorre	médio vazamento
grande vazamento	ocorre	pequeno vazamento
grande vazamento	ocorre	sem vazamento
grande vazamento	não ocorre	grande vazamento
médio vazamento	não ocorre	médio vazamento
pequeno vazamento	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	não ocorre	sem vazamento

Para o nó “VazamentoAltaPressao_VE” considerou-se que o estado “não ocorre” se dá quando o estado do nó “AumentoPressao_VE” é “não ocorre”, ou quando o estado do nó “AlivioPressao_VE” é “normal”, ou ainda quando o estado do nó “Sobrepessao_VE” é “detectada”. Caso nenhuma dessas condições seja observada, o estado do nó “VazamentoAltaPressao_VE” é “ocorre”. A TPC é apresentada a seguir:

VazamentoAltaPressao_VE	AumentoPressao_VE	AlivioPressao_VE	Sobrepessao_VE
não ocorre	não ocorre	normal	detectada
não ocorre	não ocorre	normal	não detectada
não ocorre	não ocorre	falha	detectada
não ocorre	não ocorre	falha	não detectada
não ocorre	ocorre	normal	detectada
não ocorre	ocorre	normal	não detectada
não ocorre	ocorre	falha	detectada
ocorre	ocorre	falha	não detectada

Para o nó “Sobrepessao_VE” considerou-se que seu estado somente é “detectada” quando o estado do nó “IndicadorPressao_VE” é “funciona” e o estado do nó “OperadorA” é “leitura correta” simultaneamente. Para as outras combinações de estados considerou-se que o nó “Sobrepessao_VE” tem o estado “não detectada”. A TPC desse nó é apresentada a seguir:

Sobrepessao_VE	IndicadorPressao_VE	OperadorA
detectada	funciona	leitura correta
não detectada	funciona	leitura incorreta
não detectada	falha	leitura correta
não detectada	falha	leitura incorreta

Para o nó “AlivioPressao_VE” considerou-se o estado “falha” quando ocorre o estado “falha fechada” no nó “VG11”, ou quando ocorre uma das seguintes combinações: estado “falha em abrir” no nó “PSV1” e estado “falha em abrir” no nó “PSV2”; ou estado “falha em abrir” no nó “PSV1” e estado “falha fechada” no nó “VG10”; ou estado “falha em abrir” no nó “PSV2” e estado “falha fechada” no nó “VG9”; ou estado “falha fechada” no nó “VG9” e estado “falha fechada” no nó “VG10”. A TPC do nó “AlivioPressao_VE” está apresentada a seguir:

AlivioPressao_VE	VG11	PSV1	PSV2	VG9	VG10
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	normal	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	sem falha	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	sem falha	falha fechada	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	sem falha	normal	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	sem falha	normal	normal
falha	falha fechada	sem falha	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	sem falha	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	falha fechada	sem falha	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	falha fechada	sem falha	falha em abrir	normal	normal
falha	falha fechada	sem falha	sem falha	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	sem falha	sem falha	falha fechada	normal
falha	falha fechada	sem falha	sem falha	normal	falha fechada
falha	falha fechada	sem falha	sem falha	normal	normal
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	normal	normal
falha	normal	falha em abrir	sem falha	falha fechada	falha fechada
normal	normal	falha em abrir	sem falha	falha fechada	normal
falha	normal	falha em abrir	sem falha	normal	falha fechada
normal	normal	falha em abrir	sem falha	normal	normal
falha	normal	sem falha	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	normal	sem falha	falha em abrir	falha fechada	normal
normal	normal	sem falha	falha em abrir	normal	falha fechada
normal	normal	sem falha	falha em abrir	normal	normal
falha	normal	sem falha	sem falha	falha fechada	falha fechada
normal	normal	sem falha	sem falha	falha fechada	normal
normal	normal	sem falha	sem falha	normal	falha fechada
normal	normal	sem falha	sem falha	normal	normal

Para o nó “VasoPulmao” considerou-se que a ocorrência do estado “falha fechada” nos nós “VG4” e “VG7” simultaneamente levaria ao estado “sem vazamento”. Caso isso não ocorra, e o nó “VazamentoAltaPressao_VP” apresente o estado “ocorre”, então considerou-se a ocorrência do estado “grande vazamento” no nó “VasoPulmao”. Caso essa condição também não exista, o estado do nó “VasoPulmao” será o mesmo do nó “FalhaVasoPulmao”. A TPC desse nó é apresentada a seguir:

VasoPulmao	VG7	VG4	VazamentoAltaPressao_VP	FalhaVasoPulmao
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	ocorre	grande vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	ocorre	médio vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	ocorre	sem vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	não ocorre	grande vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	não ocorre	médio vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	falha fechada	falha fechada	não ocorre	sem vazamento
grande vazamento	falha fechada	normal	ocorre	grande vazamento
grande vazamento	falha fechada	normal	ocorre	médio vazamento
grande vazamento	falha fechada	normal	ocorre	pequeno vazamento
grande vazamento	falha fechada	normal	ocorre	sem vazamento
grande vazamento	falha fechada	normal	não ocorre	grande vazamento
médio vazamento	falha fechada	normal	não ocorre	médio vazamento
pequeno vazamento	falha fechada	normal	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	falha fechada	normal	não ocorre	sem vazamento
grande vazamento	normal	falha fechada	ocorre	grande vazamento
grande vazamento	normal	falha fechada	ocorre	médio vazamento
grande vazamento	normal	falha fechada	ocorre	pequeno vazamento
grande vazamento	normal	falha fechada	ocorre	sem vazamento
grande vazamento	normal	falha fechada	não ocorre	grande vazamento
médio vazamento	normal	falha fechada	não ocorre	médio vazamento
pequeno vazamento	normal	falha fechada	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	normal	falha fechada	não ocorre	sem vazamento
grande vazamento	normal	normal	ocorre	grande vazamento
grande vazamento	normal	normal	ocorre	médio vazamento
grande vazamento	normal	normal	ocorre	pequeno vazamento
grande vazamento	normal	normal	ocorre	sem vazamento
grande vazamento	normal	normal	não ocorre	grande vazamento
médio vazamento	normal	normal	não ocorre	médio vazamento
pequeno vazamento	normal	normal	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	normal	normal	não ocorre	sem vazamento

Para o nó “VazamentoAltaPressao_VP” considerou-se que o nó “ocorre” somente será válido quando da ocorrência do estado “falha” no nó “AlivioPressao_VP” juntamente com o estado “não detectada” no nó “Sobrepessao_VP” e o estado “ocorre” no nó “AumentoPressao_VP”. Para todas as outras combinações de

estados desses nós considerou-se o estado “não ocorre” para o nó “VazamentoAltaPressao_VP”. A TPC está apresentada a seguir:

VazamentoAltaPressao_VP	AumentoPressao_VP	AlivioPressao_VP	Sobrepessao_VP
não ocorre	não ocorre	normal	detectada
não ocorre	não ocorre	normal	não detectada
não ocorre	não ocorre	falha	detectada
não ocorre	não ocorre	falha	não detectada
não ocorre	ocorre	normal	detectada
não ocorre	ocorre	normal	não detectada
não ocorre	ocorre	falha	detectada
ocorre	ocorre	falha	não detectada

Para o nó “Sobrepessao_VP” considerou-se que o estado “detectada” ocorre apenas caso sejam observados os estados “leitura incorreta” no nó “OperadorB” e “funciona” no nó “IndicadorPressao” simultaneamente. Para as outras combinações de estados, considerou-se que o nó “Sobrepessao_VP” apresenta o estado “não detectada”. A TPC desse nó está apresentada a seguir:

Sobrepessao_VP	OperadorB	IndicadorPressao
detectada	leitura correta	funciona
não detectada	leitura correta	falha
não detectada	leitura incorreta	funciona
não detectada	leitura incorreta	falha

Para o nó “AlivioPressao_VP” considerou-se que o estado “normal” ocorre apenas caso sejam observados os estados “sem falha” no nó “PSV3” e “normal” no nó “VG11” simultaneamente. Para as outras combinações de estados, considerou-se que o nó “AlivioPressao_VP” apresenta o estado “falha”. A TPC desse nó está apresentada a seguir:

AlivioPressao_VP	PSV3	VG11
normal	sem falha	normal
falha	sem falha	falha fechada
falha	falha em abrir	normal
falha	falha em abrir	falha fechada

RB de estocagem

Para o nó “VazamentoAmoniaLiquida” considerou-se o estado “grande” quando da ocorrência do estado “grande vazamento” no nó “VasoEstocagem”, “VazamentoExterno_VG13” ou “VazamentoExterno_VG14”. Caso essa condição não ocorra, considerou-se o estado “médio” na ocorrência do estado “médio vazamento” em “VasoEstocagem”, “VazamentoExterno_VG13” ou “VazamentoExterno_VG14”. Caso esta situação também não seja cumprida, considerou-se o estado “pequeno” quando da ocorrência do estado “pequeno vazamento” em um dos três nós citados. A TPC do nó “VazamentoAmoniaLiquida” é apresentada a seguir:

VazamentoAmoniaLiquida	VasoEstocagem	VazamentoExterno_VG13	VazamentoExterno_VG14
grande	grande vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	grande vazamento	grande vazamento	médio vazamento
grande	grande vazamento	grande vazamento	pequeno vazamento
grande	grande vazamento	grande vazamento	sem vazamento
grande	grande vazamento	médio vazamento	grande vazamento
grande	grande vazamento	médio vazamento	médio vazamento
grande	grande vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
grande	grande vazamento	médio vazamento	sem vazamento
grande	grande vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento
grande	grande vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
grande	grande vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
grande	grande vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
grande	grande vazamento	sem vazamento	grande vazamento
grande	grande vazamento	sem vazamento	médio vazamento
grande	grande vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
grande	grande vazamento	sem vazamento	sem vazamento
grande	médio vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	médio vazamento	grande vazamento	médio vazamento
grande	médio vazamento	grande vazamento	pequeno vazamento
grande	médio vazamento	grande vazamento	sem vazamento
grande	médio vazamento	médio vazamento	grande vazamento
médio	médio vazamento	médio vazamento	médio vazamento
médio	médio vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
médio	médio vazamento	médio vazamento	sem vazamento
grande	médio vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento
médio	médio vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
médio	médio vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
médio	médio vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
grande	médio vazamento	sem vazamento	grande vazamento
médio	médio vazamento	sem vazamento	médio vazamento
médio	médio vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
médio	médio vazamento	sem vazamento	sem vazamento
grande	pequeno vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	pequeno vazamento	grande vazamento	médio vazamento
grande	pequeno vazamento	grande vazamento	pequeno vazamento
grande	pequeno vazamento	grande vazamento	sem vazamento

grande	pequeno vazamento	médio vazamento	grande vazamento
médio	pequeno vazamento	médio vazamento	médio vazamento
médio	pequeno vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
médio	pequeno vazamento	médio vazamento	sem vazamento
grande	pequeno vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento
médio	pequeno vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
pequeno	pequeno vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
pequeno	pequeno vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
grande	pequeno vazamento	sem vazamento	grande vazamento
médio	pequeno vazamento	sem vazamento	médio vazamento
pequeno	pequeno vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
pequeno	pequeno vazamento	sem vazamento	sem vazamento
grande	sem vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	sem vazamento	grande vazamento	médio vazamento
grande	sem vazamento	grande vazamento	pequeno vazamento
grande	sem vazamento	grande vazamento	sem vazamento
grande	sem vazamento	médio vazamento	grande vazamento
médio	sem vazamento	médio vazamento	médio vazamento
médio	sem vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
médio	sem vazamento	médio vazamento	sem vazamento
grande	sem vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento
médio	sem vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
pequeno	sem vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
pequeno	sem vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
grande	sem vazamento	sem vazamento	grande vazamento
médio	sem vazamento	sem vazamento	médio vazamento
pequeno	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento

Para o nó “VazamentoAmoniaGasosa”, considerou-se que o estado “grande” ocorre quando há a ocorrência do estado “grande vazamento” em ao menos um dos seguintes nós: “ValvsManuais_AmoniaGasosa”, “ValvsAtuadas_AmoniaGasosa”, “VasoEstocagem”, “TubAntesPSVs” ou “TubAposPSVs”. Caso essa condição não seja atendida, considerou-se o estado “médio” quando há a ocorrência do estado “médio vazamento” em algum dos nós citados ou no nó “VazamentoExterno_VG11”. Caso essa condição também não seja atendida, considerou-se o estado “pequeno” quando há a ocorrência do estado “pequeno vazamento” em algum dos nós: “VazamentoExterno_VG11”, “VasoEstocagem”, “ValvsManuais_AmoniaGasosa”, “ValvsAtuadas_AmoniaGasosa”, “TubAntesPSVs” ou “TubAposPSVs”. Somente quando o estado de todos os nós citados é “sem vazamento” é que se considerou o estado “sem vazamento” para o nó “VazamentoAmoniaGasosa”. Um trecho exemplificativo da TPC desse nó é apresentado a seguir:

Vazamento Amonia Gasosa	ValvsManuais_AmoniaGasosa	ValvsAtuadas_AmoniaGasosa	Vaso Estocagem	TubAntesPSVs	TubAposPSVs	Vazamento Externo_VG11
grande	grande vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
grande	médio vazamento	sem vazamento	grande vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
grande	pequeno vazamento	sem vazamento	grande vazamento	sem vazamento	sem vazamento	médio vazamento
grande	sem vazamento	sem vazamento	médio vazamento	grande vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
médio	médio vazamento	médio vazamento	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
médio	pequeno vazamento	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento	médio vazamento
médio	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
pequeno	pequeno vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
pequeno	sem vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento

Para o nó “VasoEstocagem”, considerou-se que o estado “grande vazamento” se dá no caso de ocorrência do estado “ocorre” no nó “VazamentoAltaPressao”. Caso esse nó apresente o estado “não ocorre”, o estado do nó “VasoEstocagem” será o mesmo estado do nó “FalhaVasoEstocagem”. A TPC do nó “VasoEstocagem” é apresentada a seguir:

VasoEstocagem	VazamentoAltaPressao	FalhaVasoEstocagem
grande vazamento	ocorre	grande vazamento
grande vazamento	ocorre	médio vazamento
grande vazamento	ocorre	pequeno vazamento
grande vazamento	ocorre	sem vazamento
grande vazamento	não ocorre	grande vazamento
médio vazamento	não ocorre	médio vazamento
pequeno vazamento	não ocorre	pequeno vazamento
sem vazamento	não ocorre	sem vazamento

Para o nó “VazamentoAltaPressao” considerou-se que o estado “não ocorre” se dá quando o estado do nó “AumentoPressao” é “não ocorre”, ou quando o estado do nó “AlivioPressao” é “normal”, ou ainda quando o estado do nó “Sobrepessao” é “detectada”. Caso nenhuma dessas condições seja observada, o estado do nó “VazamentoAltaPressao” é “ocorre”. A TPC é apresentada a seguir:

VazamentoAltaPressao	AumentoPressao	AlivioPressao	Sobrepessao
não ocorre	não ocorre	normal	detectada
não ocorre	não ocorre	normal	não detectada
não ocorre	não ocorre	falha	detectada
não ocorre	não ocorre	falha	não detectada
não ocorre	ocorre	normal	detectada
não ocorre	ocorre	normal	não detectada
não ocorre	ocorre	falha	detectada
ocorre	ocorre	falha	não detectada

Para o nó “Sobrepessao” considerou-se que o seu estado é “detectada” quando o estado do nó “IndicadorPressao” é “funciona” e o estado do nó “Operador” é “leitura correta”. Caso as condições não sejam atendidas, o estado do nó “Sobrepessao” é “não detectada”. Essa TPC é apresentada a seguir:

Sobrepessao	IndicadorPressao	Operador
detectada	funciona	leitura correta
não detectada	funciona	leitura incorreta
não detectada	falha	leitura correta
não detectada	falha	leitura incorreta

Para o nó “AlivioPressao” considerou-se o estado “falha” quando ocorre o estado “falha fechada” no nó “VG11”, ou quando ocorre uma das seguintes combinações: estado “falha em abrir” no nó “PSV1” e estado “falha em abrir” no nó “PSV2”; ou estado “falha em abrir” no nó “PSV1” e estado “falha fechada” no nó “VG10”; ou estado “falha em abrir” no nó “PSV2” e estado “falha fechada” no nó “VG9”; ou estado “falha fechada” no nó “VG9” e estado “falha fechada” no nó “VG10”. A TPC do nó “AlivioPressao” está apresentada a seguir:

AlivioPressao	VG11	PSV1	PSV2	VG9	VG10
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	falha em abrir	normal	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	funciona	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	funciona	falha fechada	normal
falha	falha fechada	falha em abrir	funciona	normal	falha fechada
falha	falha fechada	falha em abrir	funciona	normal	normal
falha	falha fechada	funciona	falha em abrir	falha fechada	falha fechada

falha	falha fechada	funciona	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	falha fechada	funciona	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	falha fechada	funciona	falha em abrir	normal	normal
falha	falha fechada	funciona	funciona	falha fechada	falha fechada
falha	falha fechada	funciona	funciona	falha fechada	normal
falha	falha fechada	funciona	funciona	normal	falha fechada
falha	falha fechada	funciona	funciona	normal	normal
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	falha fechada	normal
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	normal	falha fechada
falha	normal	falha em abrir	falha em abrir	normal	normal
falha	normal	falha em abrir	funciona	falha fechada	falha fechada
normal	normal	falha em abrir	funciona	falha fechada	normal
falha	normal	falha em abrir	funciona	normal	falha fechada
normal	normal	falha em abrir	funciona	normal	normal
falha	normal	funciona	falha em abrir	falha fechada	falha fechada
falha	normal	funciona	falha em abrir	falha fechada	normal
normal	normal	funciona	falha em abrir	normal	falha fechada
normal	normal	funciona	falha em abrir	normal	normal
falha	normal	funciona	funciona	falha fechada	falha fechada
normal	normal	funciona	funciona	falha fechada	normal
normal	normal	funciona	funciona	normal	falha fechada
normal	normal	funciona	funciona	normal	normal

RB de distribuição

Para o nó “VazamentoAmoniaLiquida” considerou-se que o estado “grande” ocorre quando há a ocorrência do estado “grande vazamento” em ao menos um dos seguintes nós: “VasoEstocagem”, “VazamentoExterno_VG13”, “TubAntesEvaporador” ou “VazamentoExterno_VG14”. Caso essa condição não seja atendida, considerou-se o estado “médio” quando há a ocorrência do estado “médio vazamento” em algum dos nós citados. Caso essa condição também não seja atendida, considerou-se o estado “pequeno” quando há a ocorrência do estado “pequeno vazamento” em algum dos nós citados. Somente quando o estado de todos os nós citados é “sem vazamento” é que se considerou o estado “sem vazamento” para o nó “VazamentoAmoniaLiquida”. Um trecho exemplificativo da TPC desse nó é apresentado a seguir:

Vazamento AmoniaLiquida	Vaso Estocagem	Vazamento Externo_VG13	TubAntesEvaporador	Vazamento Externo_VG14
grande	grande vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento
grande	médio vazamento	médio vazamento	grande vazamento	médio vazamento
grande	pequeno vazamento	pequeno vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	sem vazamento	médio vazamento	sem vazamento	grande vazamento
médio	médio vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento
médio	pequeno vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
médio	sem vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento	médio vazamento
pequeno	pequeno vazamento	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
pequeno	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento	pequeno vazamento
sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento

Para o nó “VazamentoAmoniaGasosa” considerou-se que o estado “grande” ocorre quando há a ocorrência do estado “grande vazamento” em ao menos um dos seguintes nós: “VazamentoValvs_Gasosa”, “TubAposEvaporador” ou “VasoEstocagem”. Caso essa condição não seja atendida, considerou-se o estado “médio” quando há a ocorrência do estado “médio vazamento” em algum dos nós citados. Caso essa condição também não seja atendida, considerou-se o estado “pequeno” quando há a ocorrência do estado “pequeno vazamento” em algum dos nós citados. Somente quando o estado de todos os nós citados é “sem vazamento” é que se considerou o estado “sem vazamento” para o nó “VazamentoAmoniaGasosa”. Um trecho exemplificativo da TPC desse nó é apresentado a seguir:

Vazamento AmoniaGasosa	Vaso Estocagem	TubAposEvaporador	VazamentoValvs_Gasosa
grande	grande vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
grande	médio vazamento	grande vazamento	grande vazamento
grande	pequeno vazamento	grande vazamento	sem vazamento
grande	sem vazamento	médio vazamento	grande vazamento
médio	médio vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
médio	pequeno vazamento	sem vazamento	médio vazamento
médio	sem vazamento	médio vazamento	pequeno vazamento
pequeno	pequeno vazamento	pequeno vazamento	sem vazamento
pequeno	sem vazamento	sem vazamento	pequeno vazamento
sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento	sem vazamento