



Gestão & Gerenciamento

ANÁLISE FLUIDODINÂMICA PARA GERENCIAMENTO DE RISCO NAS TUBULAÇÕES COM AMÔNIA EM FRIGORÍFICOS

FLUID DYNAMIC ANALYSIS FOR RISK MANAGEMENT IN PIPES WITH AMMONIA IN REFRIGERATORS

Givaldo Leopoldo de Oliveira Junior

Pós-graduando em Gestão e Gerenciamento de Projetos, Poli/ UFRJ, RJ, Brasil.

givaldoone@icloud.com

Márcio Hervé

Mestre em Gestão Ambiental, Poli/ UFRJ, RJ, Brasil.

márcio_herve@yahoo.com.br

Resumo

Riscos gerais referentes às incertezas na operacionalidade e controle de um processo, quando contabilizados no projeto e não elencados com o correto gerenciamento, acarretam implicações e perdas significativas no âmbito econômico, ambiental e humano. Setores alimentícios de proteína animal no Brasil utilizam uma quantidade significativa de amônia nos frigoríficos, devido à alta necessidade de refrigeração em todo o processo produtivo, desde o abate, controle de qualidade e transporte. O presente estudo tem como objetivo a descrição de um cenário de vazamento, como a ruptura de uma tubulação contendo amônia aplicando modelos de dissipação contínua de vazamento, reconstituído a partir da simulação numérica com a fluido dinâmica computacional (CFD) para determinação da vazão requerida de ar para dispersão do gás poluente para que atinja concentração inferior às disponíveis em normas ambientais. A metodologia de pesquisa consistiu em um levantamento bibliográfico juntamente com a simulação a parâmetros concentrados, havendo dependência exclusivamente temporal da concentração de amônia, além da descrição fenomenológica química da neutralização e consequente eliminação, combinando dados numéricos e de literatura.

Palavras – chave: Amônia; CFD; Gerenciamento de riscos

Abstract

General risks relating to uncertainties in the operation and control of a process, when accounted for in the project and not properly managed, lead to significant economic, environmental and human implications and losses. The animal protein food sector in Brazil uses a significant amount of ammonia in slaughterhouses, due to the high need for refrigeration throughout the production process, from slaughter to quality control and transportation. The aim of this study is to describe a leak scenario, such as the rupture of a pipe containing ammonia, by applying continuous leak dissipation models, reconstructed using numerical simulation with computational fluid dynamics (CFD) to determine the required air flow to disperse the polluting gas so that it reaches a concentration lower than those available under environmental standards. The research methodology consisted of a bibliographic survey together with the simulation of concentrated parameters, with an exclusively temporal dependence on the concentration of ammonia, as well as the chemical phenomenological description of neutralization and consequent elimination, combining numerical and literature data.

Key-words: Ammonia; CFD; Risk management.

1 Introdução

A amônia é um gás produzido em processos biológicos no ciclo do nitrogênio. A composição majoritária do ar atmosférico é 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Contextualizando em ciclos biológicos a primeira etapa denominada fixação, as bactérias gram-negativas no gênero *Rhizobium* presentes em raízes de leguminosas, convertem o nitrogênio atmosférico em amônia, substrato essencial para as etapas subsequentes. Historicamente a evolução do sistema excretor dos animais é dividida em três:

- a) Amoniotélicos: secretam amônia;
- b) Ureotélicos: efetuam a conversão dos resíduos metabólicos em ureia, substância menos tóxica e com maior solubilidade em água
- c) Uricotélicos: excretam ácido úrico.

A amônia, gás incolor com massa específica menor que o ar, sendo classificado como o quinto gás mais leve, devido ao odor característico com alta intensidade, é facilmente perceptível mesmo em ínfimas concentrações, como a partir de 5 ppm (partes por milhão) (BAIRD; CANN, 2011).

A amônia não destrói a camada de ozônio (ODP=0), devido ao baixo tempo de vida na atmosfera, em torno de 15 dias, não havendo contribuição para o efeito estufa (GWP=0), podendo ser explicado pela não reatividade entre ozônio e amônia. Essa substância química na fase vapor ou líquida é extremamente irritante aos seres humanos e animais, sendo o odor altamente agressivo a característica mais singular observada (SOUSA et al, 2018). Diante da alta difusividade mássica da amônia e baixo peso molecular, dissolve-se facilmente em água e quando em contato com a pele ou mucosas, como narinas, garganta e olhos são facilmente absorvidas, causando grande irritação e dificuldade para respirar (BINA et al, 2020). Os danos não são observados somente em seres humanos; a longo prazo, em tubulações, induzem o aumento da taxa de corrosão sob tensão em aço-carbono, sendo requerido o uso de chapas de aço carbono adequadas para prevenção de rupturas (SOUSA et al, 2016).

De acordo com a norma ANSI/ASME Standard B31.5 - 2016, é proibido o uso de tubos com costura em sistemas de refrigeração que empregam amônia como fluido de trabalho, exceto pela tubulação das serpentinas ou tubos de trocadores de calor que devem ser submetidos a testes não destrutivos (SOUSA et al, 2015).

Objetivos: Obter dados numéricos de simulação computacional referente à dispersão da amônia ocasionada devido a vazamentos na tubulação, explicitando e descrevendo o gerenciamento dos riscos em uma unidade de refrigeração industrial

Justificativas: Contribuir para o desenvolvimento da segurança do trabalho, processos e meio ambiente, mediante estudo de simulação numérica para a avaliação das dispersões e potencialidades para projetos futuros.

2 Referencial teórico

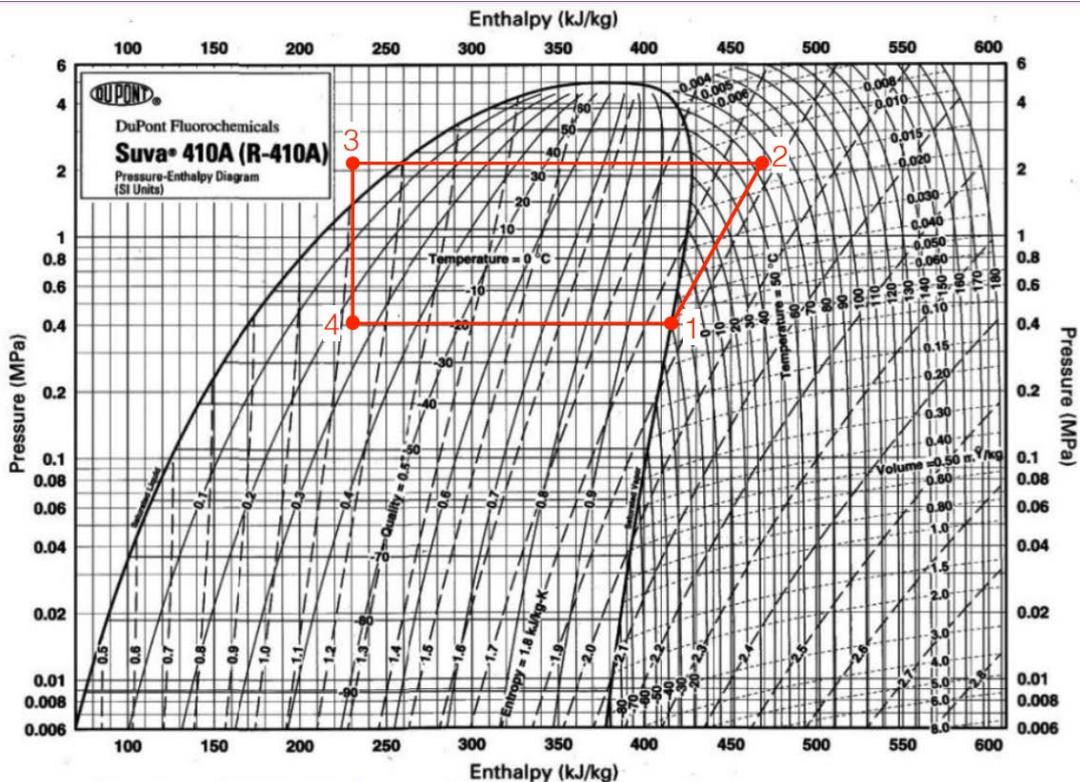
Para fundamentar o trabalho, nos próximos parágrafos serão explicitados os conceitos referentes a ciclos de refrigeração, fluidodinâmica computacional, equipamentos industriais utilizados, análise e gerenciamento de riscos.

2.1 Ciclo de refrigeração do sistema por amônia

Ciclos termodinâmicos são divididos em duas classes: potência e refrigeração, podendo ser aplicada à similaridade oposta entre ambos. Ciclos de potência retiram calor de uma fonte quente, realizam trabalho líquido e descartam o calor excedente em uma fonte fria, enquanto ciclos de refrigeração absorvem calor de uma fonte quente, comprimem e descartam em uma fonte fria, havendo obrigatoriamente a inserção de trabalho. A analogia entre ambos é que ciclos de potência produzem trabalho, enquanto os de refrigeração consomem trabalho. O descarte da energia excedente é reflexo da formulação e postulado de Clausius, em que é impossível uma máquina térmica converter integralmente calor em

trabalho, devido a inserção de uma nova variável de estado, a entropia¹. A figura 1 ilustra o ciclo de refrigeração no diagrama termodinâmico pressão e entalpia² (ÇENGEL, BOLES, 2013).

Figura 1 – Representação do ciclo de refrigeração no diagrama Pressão e Entalpia



Fonte: (ÇENGEL, Y.A; BOLES, M.A, 2013)

O ciclo de refrigeração é representado termodinamicamente pela figura 1, em que nas etapas 2-3 e 4-1 ocorre a liberação de energia para o meio externo e absorção de calor no ambiente a ser refrigerado, respectivamente, em que é aplicado tanto para diminuição da temperatura (Refrigeradores) ou aumento (Bombas de Calor). Os componentes básicos deste ciclo são: compressor, condensador, recipiente de líquido e evaporador, sendo que o presente trabalho efetuará o estudo exclusivamente no recipiente de líquido onde ocorrerá o vazamento e ao precipitador hidrodinâmico, onde haverá a neutralização do fluido excedente. (DOSSAT,2001) A aplicabilidade do Recipiente de líquido baseia-se em:

O Recipiente de líquido tem a função de absorver as oscilações de carga nos sistemas de refrigeração com múltiplos consumidores. Também auxilia no armazenamento do refrigerante, quando é necessário drenar algum desses consumidores para manutenção. O volume de operação fica em torno de 10% do volume total e o preenchimento com líquido não deve ultrapassar os 70%. (DOSSAT,2001)

¹ Entropia provém do estudo de ciclos termodinâmicos, em que é impossível que uma máquina térmica converta integral calor em trabalho, devido a irreversibilidade, perdas menores e distribuição de calor. Definido como propriedade macroscópica, aplica-se em reações químicas, avaliações de espontaneidade, ciclos de refrigeração, entre outros.

² Variável de estado que relaciona a energia de um sistema fechado, expresso pela energia interna com a soma do trabalho de escoamento, logo, a modelagem de sistemas abertos é feito em função da entalpia, por contabilizar a energia de escoamento ao longo do sistema.

Além do ciclo de refrigeração, o presente trabalho tem o enfoque de aplicar o gerenciamento de riscos para neutralização da amônia com a utilização de precipitadores hidrodinâmicos. Estes equipamentos são amplamente aplicados para tratamento de ar com remoção de poluentes, partículas em suspensão, fumaça, odores e quaisquer materiais presentes onde haja necessidade de haver controle de concentração. O princípio de funcionamento refere-se à separação do contaminante com adição de um líquido para completo contato entre as fases e transferência de massa do contaminante da corrente gasosa para a líquida.

2.2 Fluido dinâmica computacional

Fenômenos relacionados à transferência de momento, massa e energia são analisados a partir de equações diferenciais parciais, as quais efetuam a descrição de variação das propriedades de interesse em função do tempo e espaço. A utilização de processadores de alto desempenho possibilitou que os métodos numéricos disponíveis na literatura para resolução de tais equações fossem possíveis. A fluidodinâmica computacional (CFD) é fruto da evolução dos computadores, sendo definida como uma abordagem numérica que efetua a simulação de fenômenos reais a partir de modelos matemáticos, como: dispersão de gases tóxicos, distribuição de calor, obtenção de taxas de reações químicas e análise de escoamento em um duto (VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

A elaboração de um projeto em CFD inicia-se com o desenho em (CAD) da geometria em que ocorrerá o fenômeno, seguida da elaboração da malha, ou a discretização do meio contínuo, *setup* da simulação e pós-processamento dos resultados (SARAZ et al, 2017).

2.3 Análise e gerenciamento de riscos

Na operação da cadeia de frio dos frigoríficos, há uma infinidade de riscos que podem ocorrer, entre os quais se destacam os vazamentos que afetam diretamente as operações e o meio ambiente. A análise e gerenciamento de riscos é a área de conhecimento que busca compreender as possíveis fontes de risco e adequadamente gerenciá-las para mitigação e redução do impacto onde ocorre (CROWL, LOUVAR, 2015). Tratando-se de processos industriais com ênfase em frigoríficos, o risco com maior intensidade avaliado é a contaminação por amônia, a qual pode ocorrer devido ao vazamento em tubulações, manutenções de linhas e problemas operacionais, entre outros. Neste caso, o monitoramento do risco referente à amônia é contínuo, sendo necessário um gerenciamento para formulações de protocolos para determinação das corretas ações para diminuir o risco (OLIVEIRA; MONTEIRA, 2010)

Dentre as metodologias para avaliação de riscos, a amplamente difundida e aplicada a processos contínuos e descontínuos, a HAZOP (*Hazard Operability*) prediz e sistematiza os riscos de uma operação. O princípio elementar desta técnica está centrado no desvio entre o valor projetado de uma variável e o medido. Em outras palavras, a diferença entre valores da medição e estipulado resulta na informação quantitativa do risco. A elaboração de um planejamento para mitigação de riscos a partir do HAZOP, inicialmente classifica a tipologia do processo: contínua ou descontínua, posteriormente as linhas de correntes que descrevem a interação entre um equipamento ou processo, obtém-se os possíveis riscos e respectivas origens (TALBOT; JAKEMAM, 2011)

Visto que risco tem o significado de uma perda potencial, modelos estocásticos que relacionam funções de densidade de probabilidade são amplamente empregados para

estimativa da probabilidade de ocorrência de um risco em consonância com a respectiva gravidade (ALENCAR, SCHMITZ, 2012). A partir dos valores estimados efetua-se a classificação do risco, entre: leve, moderada, crítica e catastrófica, em ordem crescente de gravidade. Referente à categoria de frequência, valores de probabilidade são definidos entre 0 e 1, ou seja, probabilidade próximo a zero (improvável) quando próximo a 1 (provável) (MONTGOMERY; RUNGER, 2021).

Com objetivo de facilitar a correlação dos riscos, entende-se o Risco (R) como uma "Perda Potencial Avaliada", e pode ser definido como o produto de duas componentes - Probabilidade de Ocorrência (f) pela Gravidade da Ocorrência (g) O risco passa então a ser classificado por uma matriz de risco. Esta matriz dispõe de 4 níveis de gravidade e frequência, e cada risco identificado é avaliado de acordo com estes parâmetros (frequência e gravidade). O produto destes (f x g), gera a matriz de risco representada na figura 2.

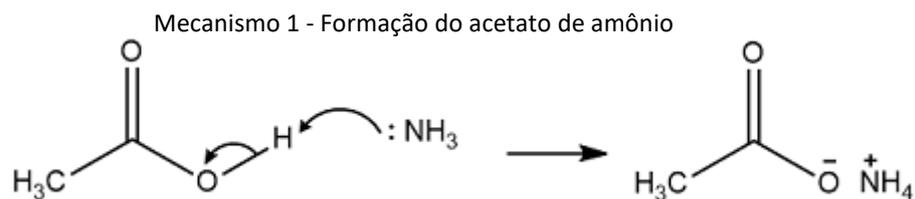
Figura 2 - Matriz de correlação dos riscos

| MATRIZ DE RISCOS | | | | | |
|------------------|------------|-------------|-------------|------------|--------------|
| Gravidade | | I | II | III | IV |
| | | Leve | Moderada | Crítica | Catastrófica |
| A | Provável | Médio | Alto | Muito Alto | Muito Alto |
| | Ocasional | Baixo | Médio | Alto | Muito Alto |
| C | Remota | Muito Baixo | Baixo | Médio | Alto |
| | Improvável | Muito Baixo | Muito Baixo | Baixo | Médio |

Fonte: (ALENCAR, SCHMITZ, 2012)

2.4 Reação de neutralização de amônia – Formação acetato de amônio

Reações químicas orgânicas são classificadas tendo como reagentes e produtos com compostos de carbono. São divididas entre duas classes: Reação de substituição e adição. Para prever a ocorrência, espontaneidade e produtos possivelmente formados, a eletronegatividade é a principal propriedade das moléculas para que promova a reação (SOLOMONS, T.W.G et al,2018). Uma das formas de mitigar o risco de contaminação de amônia, é a reação de neutralização do ácido acético glacial e amônia, para formação do sal acetato de amônio, cujo mecanismo encontra-se abaixo:



A reação orgânica presente no mecanismo 1 apresenta eletronicamente a formação do sal de acetato de amônio, conforme o mecanismo descrito a seguir:

- A amônia em fase vapor é difundida no ácido acético glacial para ocorrência de reação e energia de ativação correspondente;
- Eletronicamente o oxigênio do grupamento carboxila possui maior eletronegatividade quando comparada ao hidrogênio, deixando-o na forma ionizável;
- O nitrogênio na molécula de amônia possui um par de elétrons não ligantes, induzindo a força eletrostática do par de elétrons pela carga positiva do hidrogênio (próton);
- O hidrogênio liga-se à amônia formando o íon amônio (cátion) e o respectivo ânion acetato, que na forma ionizável é representado pela carga negativa. A formação deste sal é relativamente menos tóxica quando comparada à amônia.

2.5 Fluido de refrigeração – Amônia

Amônia é um composto inorgânico com presença de três átomos de hidrogênio e um de nitrogênio, unidos por ligações covalentes, em que há compartilhamento de elétrons. Este composto é amplamente utilizado no processamento químico em sínteses orgânicas e biológicas como manutenção e preservação de nutrientes essenciais aos seres vivos.

Diante da alta aplicabilidade dessa substância, a amônia foi um dos primeiros fluidos refrigerantes utilizados em larga escala na indústria de refrigeração, sendo que atualmente sua aplicabilidade é amplamente vista em frigoríficos e indústrias alimentícias de grande porte (LOPES et al, 2015). Um fluido de refrigeração, ou ainda fluido de trabalho, baseia-se no conceito que efetuará o ciclo de quatro etapas, entre compressão e expansão, aquecimento e transferência de calor para que se atinja o objetivo de manter um determinado ambiente em uma temperatura especificada. As propriedades físico-químicas que tornam esta substância atrativa à aplicação, são: alta eficiência na transferência de calor entre reservatórios, baixo volume específico, entalpia de vaporização alta e baixo custo. A tabela 1 detalha os valores das propriedades físico – químicas da amônia:

Tabela 1: Propriedades da amônia

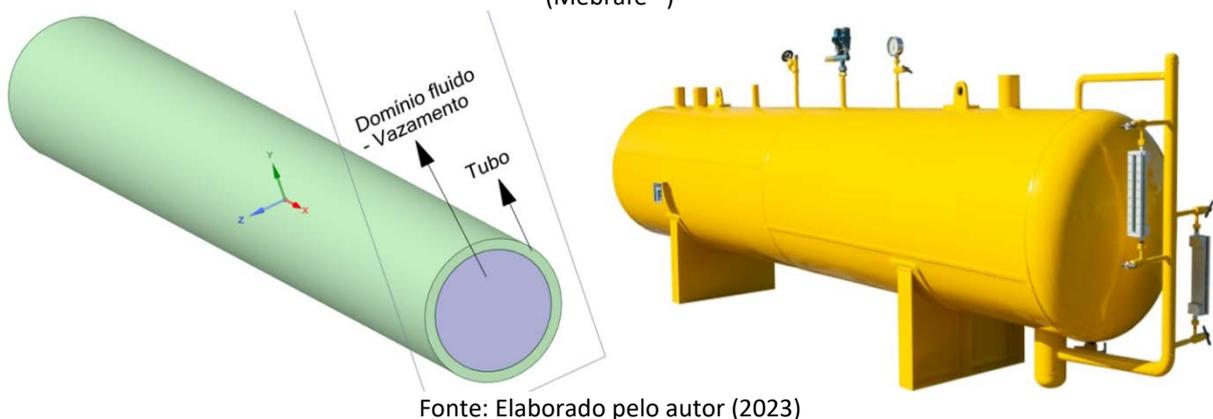
| Propriedade Físico – Química | Quantitativo |
|--------------------------------|---------------------------|
| Fórmula molecular | NH ₃ |
| Massa molecular | 17,03 kg/kmol |
| Ponto de ebulição (1 atm) | -33,4°C |
| Ponto de congelamento (1 atm) | -77,9°C |
| Volume específico (1 atm, 0°C) | 1,2954 m ³ /kg |
| Massa específica (35°C) | 587,4 kg/m ³ |
| Ponto de ignição | 651°C |

Fonte: (ÇENGEL, BOLES, 2013)

3 Materiais e Métodos

Para compreensão da cinética de vazamento e consequente neutralização, o presente estudo selecionou um trecho de tubo onde ocorrerá o rompimento e liberação da amônia para a sala confinada, que estará conectada diretamente ao precipitador pluviométrico para neutralização da toxicidade do fluido refrigerante, convertendo-o em acetato de amônio. A figura 3 ilustra inicialmente o tubo, modelado a partir de CAD para estimar o volume de vazamento em um período de uma hora e um recipiente de líquido real fabricado pela empresa Mebrafe™. Inicialmente com as dimensões disponibilizadas em manuais técnicos no software de modelagem geométrica SpaceClaim™ elaborou-se o corpo de estudo. A justificativa para elaboração do desenho somente de um trecho e não do equipamento por completo, refere-se a economia de processamento da solução, visto reduzir a quantidade de elementos de malha para o estudo.

Figura 3 - CAD (Rompimento pontual em um trecho da tubulação no vaso de pressão) e Vaso de pressão (Mebrafe™)



3.1 Setup da simulação

As configurações da simulação foram baseadas na reprodutibilidade e definição do modelo matemático equivalente aos fenômenos de transporte que ocorrem no interior do equipamento. A física avaliada foi transiente, analisando uma hora de vazamento do fluido de refrigeração, com objetivo de estimar a vazão de amônia no rompimento do tubo, com as equações de Navier-Stokes em função da pressão e velocidade absoluta (WELTY; RORRER, 2017). A turbulência foi descrita pelo modelo k-epsilon (2 equações) devido a simplicidade da molécula da amônia, havendo pouca influência viscosa e convectiva para transferência de momento.

4 Resultados

Dentre o conjunto de resultados obtidos numericamente pela simulação via CFD, enfatizou-se a vazão de vazamento, queda de pressão e distribuição espacial da nuvem no momento do rompimento do tubo.

Dentre as variáveis avaliadas no modelo em CFD, selecionou-se as que tinham relação direta com as medidas de gerenciamento de riscos e que foram levadas em contas para o correto projeto de mitigação dos riscos.

- Pressão de operação: Medida pelo manômetro disponível no equipamento, sendo inserida no modelo para determinação das variáveis de escoamento pela resolução das equações de continuidade;
- Vazão mássica: Definida pelo volume que atravessa uma determinada área de secção transversal em um intervalo de tempo. Para obtenção do valor calculou-se a integral de superfície do diâmetro ocasionado pelo vazamento durante uma hora de vazamento ininterrupto;
- Largura do *Puff*: Nuvem resultante pela liberação de gás contaminante no período de uma hora de liberação contínua da amônia. As dimensões da nuvem foram calculadas a partir dos coeficientes difusivos mássicos da amônia e das condições ambientais. Dentre os modelos disponíveis no software e aplicados na literatura, o modelo de Pasquill- Gifford prediz, a partir da velocidade do vento, posição, tempo e condições climáticas a influência na dispersão de contaminantes e conseqüente dimensão da nuvem. Aplicando este modelo para a situação do problema com velocidade do vento em 5,67 m/s e condições climáticas ensolaradas durante o dia, com temperatura ambiental média de 25 a 30°C, estimou-se a largura da nuvem resultante (CROWN, LOUVAR, 2015).
- Tempo de dispersão: Considerando a análise cinética para dispersão dos gases, contabilizando a concentração média no núcleo da nuvem, é possível estimar em função da velocidade do vento, qual o tempo necessário para dispersão do *puff* até atingir a concentração abaixo da toxicidade prevista em norma.

Os resultados numéricos detalhados acima estão contidos na tabela 2:

Tabela 2: Resultados CFD

| Variável de escoamento | Valor | Unidade |
|------------------------|-------|------------------------|
| Pressão de operação | 12,5 | [kgf/cm ²] |
| Vazão mássica | 1,26 | [kg/min] |
| Largura do <i>puff</i> | 45,75 | [m] |
| Tempo para dispersão | 7,93 | [s] |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Com os resultados numéricos obtidos, estimou-se dois cenários para o gerenciamento e controle do risco: determinação da vazão de ar necessária para dissipação da amônia em concentração abaixo da tóxica por normas internacionais (*Emergency response planning guidelines - ERPGs*) em menor tolerância na concentração em partes por milhões (25 ppm); A segunda metodologia aplicada refere-se à estimativa do volume reacional necessário para conversão de amônia em acetato de amônia, formando um produto com toxicidade inferior quando comparada ao fluido de refrigeração.

A primeira metodologia para estimativa da vazão necessária do ar, refere-se à métodos empíricos relacionando as seguintes propriedades: classe e volume de equipamentos, massa específica, cálculo da massa total do frigorífico contabilizando equipamentos e respectivos volumes, estimando a vazão de ar pela seguinte correlação, obtendo o valor da vazão em litros por segundo, estipulado por norma internacional (ANSI/IIAR 2-2008)

$$Q_{ar} = 70 \times \sqrt{MTF} \quad (\text{Equação 1})$$

O volume total do frigorífico (MTF) aplicado a este trabalho, totaliza-se em 24.57 kg/h, resultando uma vazão de ar calculada a partir da equação 1 de 346.98 kg de ar/h. Para que a segurança do processo esteja em nível adequado, a vazão de ar disponível deve ser maior que a requisitada. No presente frigorífico a vazão disponível é de 1156.59 kg de ar/h colaborando para a segurança e atendendo aos critérios de execução e planos do gerenciamento de riscos O descritivo das informações aplicadas está disponível na tabela 3.

Tabela 3: Quantificação da vazão de ar necessária para dispersão da amônia

| Equipamento | Volume (m ³) | Densidade (kg/m ³) | Massa equipamento (kg) | Massa total fluido (kg) | Vazão de ar (L/s) (q) | Vazão de ar disponível (L/s) (v) |
|-----------------------|--------------------------|--------------------------------|------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------------------|
| Recipiente de Líquido | 4.20 | 5.85 | 24.57 | 24.57 | 346.98 | 1156.59 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

4.1 Gerenciamento de riscos – Neutralização de amônia e volume do meio reacional

Com objetivo de garantir a operacionalidade e comprovação de neutralização da amônia juntamente com a vazão do ar, foi determinado o volume reacional presente no precipitador hidrodinâmico, necessário para conversão da amônia em acetato de amônio. Considerando uma reação elementar, isotérmica, ocorrendo em um reator tubular, com compressão de volume devido o contato entre fase gasosa (amônia) e líquida (ácido acético glacial) a equação 2 dimensiona o volume do equipamento:

- Inicia-se o dimensionamento do meio reacional com a escolha do reator, neste caso, um reator tubular (PFR);
- Expressou-se a quantidade de mol em função da concentração molar;
- A concentração do reagente limitante (amônia) substituída pela conversão (porcentagem da amônia que reage para formar acetato de amônio);
- Diante do contato mássico entre o reagente limitante que se encontra na fase gasosa com o ácido acético na fase líquida, a reação ocorre com redução de volume a qual é dimensionada com variação na vazão volumétrica.

Considerando os itens elencados acima juntamente com as hipóteses, a equação resultante para o dimensionamento do volume do reator em função da conversão encontra-se na equação 2.

$$\frac{dX}{dV} = \frac{kC_{Ace}(0.5 - X)^2}{V_0(1 - 0.5X)} \quad (\text{Equação 2})$$

Sendo: X a conversão da amônia em acetato de amônio, k a constante cinética da reação, C_{Ace} concentração molar inicial do ácido acético glacial, V₀ vazão volumétrica.

Considerando que o precipitador hidrodinâmico possui 300L de volume disponível para o volume reacional, alcance-se a conversão de 49%, ou seja, 49% da amônia é convertida em acetato de amônia. Considerando a escala e dimensionamento do precipitador hidrodinâmico, a conversão alcançada pode ser aumentada pelo controle da vazão de amônia com linhas intermediárias e conseqüentemente aumento de tempo de residência entre os reagentes. Para que haja o contato entre os reagentes, neste caso, há limitadores de reações e de transferência de massa, sendo necessários arranjos industriais secundários para contorno da especificidade. (FOGLER, 2009)

5 Considerações finais e perspectivas futuras

O presente trabalho teve como objetivo ampliar o conhecimento a respeito de análise e gerenciamento de riscos a partir de ferramentas computacionais como o CFD e de reatores químicos. Para isto, aplicou-se em um frigorífico onde é empregada uma quantidade significativa de amônia como fluido de refrigeração para avaliar o risco de contaminação de amônia na situação hipotética de elevação de pressão no tanque de armazenamento e conseqüente rompimento de um duto com liberação da amônia para a sala confinada e subseqüente neutralização com ácido acético. Avaliou-se que metodologias para estudo como HAZOP são amplamente difundidas e eficazes para aprimoramento do know-how de segurança de processo. Com a aplicação da fluidodinâmica computacional foram obtidos os perfis de escoamento, concentração média em nuvens de dispersão, distribuição de pressões a partir de modelos de turbulência e dispersão contínua para determinação da vazão e variáveis de escoamento. Foi possível concluir que a partir da correlação empírica e a determinação do volume reacional, a estratégia de gerenciamento de riscos está completa, com duas medidas de segurança complementares a ser acionadas caso a emergência ocorra. Além disto, foi verificado que as estimativas de ar e volume reacional necessárias para a segurança da operação são condizentes com as disponíveis nos requisitos reais e no processo.

Pode-se concluir que ambas as variáveis requisitadas no projeto atendem ao critério de segurança industrial e, quando aplicadas concomitantemente, mitigam os riscos de contaminação e diminuem, em caso de acidentes em maior escala, a gravidade da ocorrência.

Como perspectivas futuras são recomendadas a avaliação sistêmica de vazamento no ciclo completo de refrigeração e estudo cinético da reação de formação de acetato de amônio. A conversão alcançada de 49% pode ser aprimorada com adição de catalisadores e acessórios que aumentem a transferências de massa entre as fases, retificando os parâmetros operacionais para otimizá-la.

Referências

- ALENCAR, Antonio Juarez; SCHMITZ, Eber Assis. **Análise de risco em gerência de projetos: com exemplos em @risk**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Brasport, 2012. 244 p. ISBN 9788574525426
- ANSI/IIAR - The International Institute of All-Natural Refrigeration. **ANSI/IIAR 2-2008: Equipment, Design & Installation of Ammonia Mechanical Refrigerating Systems** – International Institute of Ammonia Refrigeration: ANSI, 2008, EUA, 86p.
- BAIRD, Colin; CANN, Michael. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre, RS: Bookman, 2011. xi, 844 p. ISBN 9788577808489

BINA, G. de P., ALMEIDA, G. H. R. de, SOUZA, M. de, PIETRO, R. N. de, MARIN, M. P. de A., Franco, I. C. (2020). **Development of an application for mobile devices applied to process security: preliminary hazard analysis (PHA)**. The Journal of Engineering and Exact Sciences, 6(4), 0564–0576. <https://doi.org/10.18540/jcecvl6iss4pp0564-0576>

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre, RS: AMGH, 2013. 1018 p. ISBN 9788580552003.

CROWL, Daniel A.; LOUVAR, Joseph L. **Segurança de processos químicos: fundamentos e aplicações**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2015. xxiv, 654 p. ISBN 9788521625186.

DOSSAT, Roy J. **Principles of refrigeration**. 5th. ed. New Jersey, USA: J. Wiley & Sons, 2001. x, 454 p. ISBN 9780130272706

FOGLER, H. Scott. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009. 853 p. ISBN 9788521617167.

LOPES, Toni Jefferson; BARROS, Ricardo; SANTOS, Nara Lúcia; COSTELLI, Murilo Cesar; SILVA, Adriano; CANCELIER, Adriano. **Análise de risco aplicada a instalações industriais de refrigeração que utilizam amônia**. Revista do Centro do Ciências Naturais e Exatas - UFSM, Santa Maria. Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental - REGETE-iSSN 2236 1170 - V. 19, n. 1, jan.- abr. 2015, p.160-166

MONTGOMERY, Douglas C; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 7. Rio de Janeiro: LTC, 2021. 1 recurso online. ISBN 9788521637448.

OLIVEIRA, Paulo Armando Victoria; MONTEIRA, Alessandra Nardina Trícia Rigo. **Emissão de amônia na produção de frangos de corte**. Embrapa Agricultura Digital, EMBRAPA, 2010.

SARAZ, Jairo A. O., ROCHA, Keller S. O., DAMASCENO, Flavio A., TINOCO, Ilda F. F., OSORIO Robinson, TOBÓN, Júlio C. A. **A CFD Approach to Assess the Effects of Different Opening Combinations in Poultry Houses**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 21.12 (2017): 852-57. Web.

SOLOMONS, T. W. Graham; FRYHLE, Craig B.; SNYDER, Scott A. **Química orgânica**. 12. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2018. 2 v. ISBN 9788521635475 (v.1).

SOUZA, Fernanda Campos, TINÔCO; Ilda Fátima Ferreira, BAPTISTA, Fátima; CRUZ, Vasco Fitas; SOUZA, Cecília Fátima; SILVA, Alex Lopes. **Quantificação de amônia em instalações de produção de frangos de corte em clima quente**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente 11.3 (2018): 879-99. Web.

SOUZA, F. C., TINÔCO, I. F. F., PAULA, M. O., SILVA, A. L., SOUZA, C. F., BATISTA, F. J. F., BARBARI. M. **Medidas para minimizar a emissão de amônia na produção de frangos de corte: revisão**. Revista Brasileira De Engenharia De Biossistemas (Online) 10.1 (2016): 51-61. Web.

SOUZA, F. C.; TINÔCO, I. F. F.; SARAZ, J. A. O; SOUZA, C. F.; PAULA, M. O.; SILVA, A. L.; COELHO, D. J. R. **Métodos de difusão passiva para quantificação de amônia em instalações abertas para produção animal**. Revista Brasileira De Engenharia De Biossistemas (Online) 9.3 (2015): 252-60. Web.

TALBOT, Julian; JAKEMAN; Miles. **Security Risk Management Body of Knowledge**. 1st ed. Vol. 69. Newark: Wiley, 2011. Wiley Ser. in Systems Engineering and Management. Web.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2nd ed. Harlow: Pearson Education, c2007. 503 p. ISBN 9780131274983.

WELTY, James R.; RORRER, Gregory L.; FOSTER, David. **Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2017. 703 p. ISBN 9788521634188.