



XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo – 13 à 15 de setembro de 2023

SISTEMA DE VENTILAÇÃO E DEPURAÇÃO EM UNIDADES URBANAS DE REFRIGERAÇÃO BASE AMÔNIA(NH₃).

PAPER 85

RESUMO

Do ostracismo nas instalações urbanas de refrigeração à opção de primeira seleção em instalações industriais, a refrigeração base amônia(R717), reporta-nos à lembrança olfativa das fábricas de gelo em zonas pesqueiras e atualmente, aos bastidores de indústrias alimentícia, farmacêutica e de armazenamento, com uma realidade moderna e eficiente de instalações monitoradas e de elevada performance. Uma estatística entre a capacidade instalada versus quantidades vazadas, apontam para números entre 2 a 17%, a depender da idade da instalação, sendo as causas principais de vazamento, a corrosão e ações de manutenção. Os vazamentos geram cenas de pânico, impacto à vizinhança e até, em muitos casos, provocam intoxicação, queimaduras de mucosas, inclusive oculares com registros de cegueira e mesmo alguns raros casos fatais. Historicamente as centrais de compressão de amônia eram abertas para garantir a dissipação térmica dos compressores com mínimo custo de ventilação, entretanto, ocorrências de vazamentos, induziram a uma mudança na especificação com a adoção de sistemas mecânicos de ventilação, confinamento das instalações e tecnologias de depuração da amônia em casos de vazamentos. Nosso estudo propõe o uso de equipamentos de rota úmida, como lavadores de gases e precipitadores hidrodinâmicos, operando com líquidos ácidos para absorção da amônia e sua neutralização.

Palavras-chave: Amônia. Refrigeração industrial. Vazamento amônia. Ventilação centrais de amônia. Neutralização amônia.

ABSTRACT

From ostracism in urban refrigeration installations to the first choice option in industrial installations, ammonia-based refrigeration (R717) takes us back to the olfactory memory of ice factories in fishing areas and currently, behind the scenes of food, pharmaceutical and storage industries, with a modern and efficient reality of monitored and high performance installations. A statistic between the installed capacity versus leaked quantities, point to numbers between 2 and 17%, depending on the age of the installation, the main causes of leakage being corrosion and maintenance actions. Leaks generate scenes of panic, impact on the neighborhood and even, in many cases, cause intoxication, burns of mucous membranes, including eyepieces with records of blindness and even some rare fatal cases. Historically, ammonia compression plants were open to ensure thermal dissipation of compressors with minimal ventilation costs, however, occurrences of leaks induced a change in specification with the adoption of mechanical ventilation systems, confinement of facilities and purification technologies ammonia in case of leaks. Our study proposes the use of wet route equipment, such as gas scrubbers and hydrodynamic precipitators, operating with acidic liquids to absorb ammonia and neutralize it.

Keywords: Ammonia. Industrial refrigeration. Ammonia leak. Ammonia central ventilation. Ammonia neutralization.

1 INTRODUÇÃO

Amônia ou R717, é um fluido refrigerante natural ideal, com tempo de degradação curto(14dias) que não agride o meio ambiente, não interage com a Camada de Ozônio (ODP = 0) e tampouco contribui com o aquecimento global (GWP = 0). Formado a partir dos elementos mais abundantes no planeta, e com propriedades termodinâmicas favoráveis que superam a dos refrigerantes sintéticos em até 20% da performance, graças ao seu calor de vaporização da ordem de 1368 kJ/kg, cinco vezes maior que os clássicos HFCs, além de sua excelente capacidade volumétrica de resfriamento.

Seu custo de aquisição é baixo e também possui baixa densidade de vapor, o que possibilita a utilização de vasos de pressão, trocadores de calor e tubulações de menores dimensões. No entanto, desvantagens de segurança, odor repugnante e inflamabilidade, têm impedido a utilização da amônia em aplicações comerciais de menor porte. Historicamente é especialmente aplicável em grandes instalações industriais e sistemas em cascata, onde suas vantagens podem ser completamente utilizadas com dezenas de toneladas do fluido operando no processo.

Carl Von Linde, em 1876, inaugurou o histórico das instalações industriais, base amônia, de frigoríficos, cervejarias, centrais de água gelada das indústrias, túneis de congelamento, centros de distribuição de refrigerados e congelados, instalações aeroportuárias e de portos; entretanto o adensamento urbano potencializado por acidentes graves e o advento do famoso HCFC e seus substitutos hidrofluorcarbonetos HFC, levaram a amônia para o uso restrito a instalações em distritos industriais por várias décadas. Atualmente a amônia tem sido protagonista na viabilização de sistemas de aquecimento. Na Europa, a partir do emprego de grande bomba de calor, como na cidade de Drammen, na Noruega, construiu-se uma usina de aquecimento distrital, baseada em bombas de calor para utilizar a energia da água do fiorde. Esta instalação inclui atualmente a maior bomba de calor de alta temperatura baseada em amônia do mundo e fornece cerca de 70% da rede de aquecimento distrital com calor barato e ecológico. Cada bomba de calor requer uma quantidade de enchimento de apenas 1.000 kg de amônia que aliada a tecnologias de controle, como a de receptor de baixa pressão, ventilador EC e de controle PLC, consome cerca de 15% -20% menos energia do que os sistemas convencionais de aquecimento urbano ou refrigeração industrial, baseados em refrigerantes sintéticos HFCs (Euroammon articles, 2014). Vem da Europa também o uso misto de circuitos de amônia em baixas temperaturas no segmento de lazer. Num centro de esportes de inverno austríaco adotou-se uma planta de refrigeração de amônia, com evaporação direta, para as instalações de hóquei no gelo e curling, com as vantagens energéticas e ecológicas neutras de impacto nas mudanças climáticas. A evaporação direta garantiu uma baixa temperatura em toda a superfície de gelo da pista de curling. Nesta mesma instalação temos um circuito secundário de glicol integrado no sistema central de amônia

responsável pela refrigeração necessária para climatizar áreas comuns do complexo esportivo. A projetista também trabalhou em conjunto com as autoridades austríacas e os bombeiros para desenvolver um conceito de segurança para a planta de refrigeração de amônia urbana.

Os acidentes causam pânico devido ao reduzido limiar de percepção (< 5ppm), além de ser um gás irritante das vias respiratórias, olhos e pele podendo causar queimadura das mucosas inclusive oculares com risco de cegueira, danos aos pulmões como irritação, edema e hemorragia. Em altas concentrações pode causar parada respiratória, arritmia cardíaca e morte por asfixia; a incidência de vazamentos específicos em plantas industriais aumentou no patamar de 4 para 9 ocorrências nos anos de 2012 para 2016 segundo o Corpo de Bombeiros de Goiás, 13 ocorrências com amônia em Minas Gerais no triênio 2015/17 e cerca de 128 atendimentos em três décadas no estado de São Paulo conforme dados publicados em reportagem (Klassmann ,2017).

No Brasil a NR-36 - Segurança e Saúde no Trabalho em empresas de abate e processamento de carnes e derivados, estabelece condutas e práticas para estabelecimentos de alimentos cárneos, com o manuseio de amônia que prevê no item 36.9.3.2.1 "Em caso de vazamento de amônia, o painel de controle do sistema de refrigeração deve:

- a) acionar automaticamente o sistema de alarme;
- b) acionar o sistema de controle e eliminação da amônia."

Portanto, existe a previsão legal para implantação de unidades emergenciais de captação e abatimento de amônia que devem estar disponíveis para operar automaticamente.

Mundialmente a amônia é empregada em sistemas de refrigeração e tem seus valores de exposição estabelecidos para TLV-TWA para jornadas de oito horas e 40 horas semanais de exposição continuada sem efeitos adversos à saúde e TLV-STEL que é o teto para exposições instantâneas limitadas a 15 minutos desde que o TLV-TWA esteja atendido permanentemente. A tabela 1 apresenta uma visão mundial dos padrões limites para exposição a vapores de amônia.

A necessidade de ventilação para remoção de saturação térmica dos motores e compressores, induziu o perfil de instalações típicas com casas de máquinas abertas para favorecer a ventilação e a dissipação térmica, permitindo assim, a migração de odores; com a revisão da NR36(Mtb, 2018), veio uma série de medidas preventivas de detecção, sistemas ativos de extinção de incêndios e alarmes. Em caso de vazamento de amônia, são acionados automaticamente, o painel de controle do sistema de refrigeração, o sistema de alarme e o sistema de controle e eliminação da amônia.

Tabela 1- Panorama mundial dos limites de exposição

VALORES LIMITES DE AMÔNIA PARA SEGURANÇA OCUPACIONAL E SEGURANÇA DA EMPRESA			
WES (Austrália e NZ)	TWA	25 ppm	17 mg/m ³
WES (Austrália e NZ)	STEL	35 ppm	24 mg/m ³
OSHA	PEL	50 ppm	35 mg/m ³
ACGIH	TLV	25 ppm	17 mg/m ³
ACGIH	STEL	35 ppm	
TRGS900	MAK	50 ppm	35 mg/m ³
DFG	MAK	20 ppm	14 mg/m ³
França	VLE	50 ppm	
Grã Bretanha	LTEL	25 ppm	
UE	OEL-TWA	20 ppm	
UE	OEL-STEL	50 ppm	
	IDLH	500 ppm	

Fonte: Dräger.

2 CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DO FLUIDO E ASPECTOS DE TOXICIDADE

A amônia (NH₃) é um composto químico incolor, de odor forte e irritante, e conforme a classificação da ONU (Organização das Nações Unidas) para os produtos perigosos, a amônia pertence à subclasse de risco 2.3, significando gás tóxico por inalação. Para fins de identificação, o produto possui o número da ONU 1005 e de risco 268, cuja descrição é gás tóxico e corrosivo.

Neste ponto cabe deixar claro os riscos e circunstâncias em que o vazamento de amônia pode gerar situações críticas e para tal faz-se necessário conhecer suas características físico-químicas como mostra a tabela 2, onde temos a amônia líquida com pressões de 8,6 bar, quando a sua inflamabilidade somente ocorre com presença de fonte de ignição potente(>630°C); e caso a umidade se eleve, o LEL ("Low Explosion Limit") torna-se desprezível pois a amônia se hidrata. A maioria das explosões ocorre quando os tanques de armazenamento são expostos a temperaturas elevadas por incêndios de outras fontes, por isso a importância de se proteger esses tanques com nebulizadores; já a sua toxicidade severa se dá em valores 500% acima do registrado para sua percepção; ou seja toda a gravidade de vazamentos acidentais ou inespecíficos de amônia de pequeno porte é por conta da repugnância de seu odor que causa pânico e as consequências do efeito manada, por esse motivo a conscientização dos colaboradores e vizinhança, formação de equipes de controle e a implantação de infraestrutura de detecção e abatimento da amônia é uma condição precípua para operar em segurança com este excelente fluido refrigerante.

Tabela 2 - Características físico químicas da amônia

AMÔNIA NOS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO: RESUMO DOS NÚMEROS MAIS IMPORTANTES	
Massa molar	17,03 kg/kmol
Ponto de ebulição	-33,3 °C
Estado físico em condições normais	gasoso, liquefaz sob pressão (8,6 bar a 20 °C)
Limite inferior de explosividade*	15 vol. % (ou 108.000 mg/m³)
Limite superior de explosividade* *a 20 °C e 1,013 bar	30,2 vol. % (ou 240.000 mg/m³)
Temperatura de ignição	650 °C
Limite de detecção	5 ppm 3,5 mg/m³ (0,02 a 70 ppm)
Sintomas de intoxicação	2.500 ppm 1.750 mg/m³
Concentração fatal	5.000 ppm 3.500 mg/m³

Fonte: www.euroammon.com

3 Infraestrutura de detecção, ventilação e contenção

Muitos problemas são causados por inobservância das recomendações e diretrizes exaradas pelas ASHRAE Standard 15 e IIAR Standard 2, no tocante a projeto, construção e instalação, como por exemplo a limpeza de linhas dos fluidos. Como inicialmente citado, as instalações dos compressores e bombas dos circuitos de amônia eram implantadas em casas de máquinas abertas e atmosféricas, visando assegurar trocas térmicas para a remoção do calor dissipado pelos equipamentos. Como eram instalações industriais em locais ermos, a difusão de informações de vazamentos eram quase que toleradas, pois a dispersão ambiental era rápida face a sua ascensão de difusão por ser mais leve que o ar, na forma anidra. Com o adensamento urbano e a realidade tropical, de que os elevados valores da umidade atmosférica fazem os vazamentos de amônia estacionarem no nível do solo, provocando intoxicação continua, agravada pela umidade das mucosas tornando a realidade muito crítica, com as consequentes queimaduras e sequelas. Nesse cenário nasceu o conceito de que o ambiente das salas de compressores deve permanecer em pressão negativa, com a captação localizada junto a painéis de válvulas e pontos de purga, e que devem dispor de sistemas de detecção e exaustão integrados, permitindo a exaustão localizada instantânea e a concomitante depuração da amônia por reação química, transformando-a em um líquido estável, inodoro e não corrosivo.

Figura 1- Compressores em ambiente confinado



Fonte: CD Mundial Supermercados, 2015.

O emprego de conceitos de ventilação de insufla – exaure (“push-pull”) combinado com os conceitos de fluxos descendentes (“down draft”), onde o ar é insuflado de cima para baixo em trajetória longitudinal do ambiente, são as mais recomendadas; porém deve-se tomar cuidado com a posição dos sensores para não gerar informação falsa acerca da efetiva concentração interna do ambiente, os sensores devem operar em rede paralela de maneira que qualquer sensor possa detectar e alarmar. Protocolos de ingresso no ambiente sinistrado, como na figura 2 (a porta de acesso com alarme sonoro luminoso), devem ser precedidos por rotinas de monitoramento com indicação visual de que o ambiente interno está seguro.

O projeto deve caracterizar, através da análise de risco, o mapeamento dos pontos vulneráveis a vazamentos, como o “skid” de bombas, válvulas de segurança dos compressores, painéis de válvulas de reversão, pontos de purgas e tanques de armazenamento de forma que a rede de captos focais e bocais de admissão de ar externo promovam o efeito de fluxos descendentes assegurando a remoção de calor em ciclos normais de operação e sejam eficientes em eventos de vazamentos acidentais ou inespecíficos.

Figura 2 - Porta de acesso controlada por sensores



Fonte: Inspeção de campo fábrica de sorvetes – RJ.

A potência dos compressores e seus motores elétricos subsidiam o cálculo da carga térmica que irá determinar os valores de exaustão da sala para assegurar temperaturas internas como + 5°C, em relação à temperatura externa à sombra; e, na ocorrência de vazamentos detectados, o sistema deve responder com um incremento de vazão que assegure pressão negativa na sala de máquinas e um tempo de evacuação aceitável pelas premissas do projeto. Normalmente o sistema opera com dois patamares de vazão, uma que atenda à remoção de calor do ambiente e outra emergencial que assegure mais de 30 renovações horárias do volume interno dos ambientes beneficiados. A figura 3 mostra que é possível monitorar e acionar alarme em caso de vazamento acidental, durante rotinas de manutenção de válvulas. Os captoreis focais de grelhas com registro de regulação permitem o ajuste das taxas de velocidade de exaustão focal de acordo com o risco, permitindo assegurar pressão negativa no ambiente.

No cálculo de vazão de exaustão devem ser consideradas 4 rotas de análise a saber:

- a) Velocidade mínima de face nas áreas de admissão de ar externo para assegurar pressão negativa interna;
- b) Cálculo pelo perímetro dos captoreis utilizando valores referenciados pelo industrial ventilation – 2019 edition;
- c) Valores de exaustão requeridos para alcançar concentração interna abaixo do TLV da amônia (25 ppm) num período de tempo razoável como de 15 minutos;
- d) Valores de exaustão que assegurem concentrações inferiores ao LEL (15%v/v) para situações de grandes vazamentos, como no cisalhamento de uma tubulação.

Figura 3 -Painel de válvulas com emergência manual



Fonte: Sala de máquinas de fábrica de sorvete- RJ.

Deve-se adotar o maior valor encontrado e havendo valores muito elevados no caso da rota para garantia do TLV, pode-se aumentar o tempo de liberação do ambiente; já pelo LEL essa prerrogativa não se aplica face aos riscos interpostos.

A ocorrência do cisalhamento de uma tubulação integral é um evento não muito provável, devendo ser considerado, apenas vazamentos em válvulas. A soma das áreas equivaleria a uma ruptura 3" de diâmetro.

Nas rotas de cálculo faz-se uso de fórmulas corriqueiras de cálculo de vazão para as rotas "a" e "b":

$$Q = v \cdot A \quad (1)$$

Onde: Q = Vazão (m³/h)

v = Velocidade de face (m/h)

A= Área da face (m²)

Já para o cálculo da rota "c", de vazão pelo TLV, faz-se necessário o uso de equação baseada no volume molar:

$$Q = G \cdot \frac{387}{P_{mol}} \cdot \frac{10^6}{TLV} \cdot K \quad (2)$$

onde: Q = Taxa de ventilação (ft³/min)

G = taxa de geração da substância que se quer diluir (lb/min)

387 = volume de 1 lbmol de qualquer gás a 21°C a 1 atm, volume molecular (ft³/lb)

Pmol = peso molecular da substância que se quer diluir (lb)

TLV = limite de tolerância para a substância poluente (25 ppm)

K = coeficiente de segurança (1,5 para amônia (FISPQ Petrobras/Ultrafértil))

Aqui podemos calcular o tempo para liberação de acesso ao local sinistrado, considerando uma concentração inicial de um vazamento e a concentração final segura para reingresso no ambiente:

$$Q = \frac{V}{t} * \ln \frac{C_0}{C} \quad (3)$$

onde: Q = Taxa de ventilação (m³/min)

V = Volume do ambiente (m³)

C₀ = Concentração inicial

C = Concentração final após o tempo t

t = Tempo para que a concentração inicial C₀ atinja o valor final C (min)

E finalmente para o cálculo pela rota “d”, de vazão pelo LEL, faz-se necessário o uso de equação baseada no volume molar e características de inflamabilidade da substância:

$$Q = G \cdot \frac{387}{P_{mol}} \cdot \frac{10^2}{LEL} \cdot \frac{f_s}{B} \quad (4)$$

onde: f_s = fator de segurança que depende da porcentagem do LEL (15%)

B = constante que leva em conta o fato que LEL diminui quando a temperatura aumenta (0,7 para T<121°C).

4 Tecnologias de depuração de amônia

O uso de tecnologias de depuração de gases pela rota úmida é bastante consagrado, haja vista que um volume de líquido solubiliza 1300 de amônia gasosa, isto é, em massa temos 46/100g de água.

O emprego de lavadores de gases contra corrente, operando com líquidos ácidos, pois a amônia é uma base alcalina fraca, permite a contenção e eliminação do impacto de vizinhança. A questão é que os lavadores de aspersão requerem um tempo de residência(2s) e velocidades internas reduzidas(4m/s) formando assim torres de lavagem com 10m de altura e grandes volumes de equipamentos, pois as vazões de ar processadas são significativas devido aos volumes típicos das casas de máquinas e a necessidade de remoção de calor dissipado pelos compressores.

Outra tecnologia que desponta com vantagens de eficiência, compactidade e capacidade própria de gerar a exaustão, é a dos precipitadores hidrodinâmicos que operam com a tecnologia de centrifugação líquida multiventuri, promovendo a exaustão do ambiente, através de seu rotor tipo “limit load” capaz de vencer perdas de carga do sistema e gerar a sinérgica centrifugação simultânea do ar contaminado com amônia e o líquido ácido de neutralização.

Figura 4 – Torre de lavagem contracorrente em polipropileno



Fonte: Laboratório Farmacêutico-RJ,2022.

A fundamentação tecnológica é oposta à das torres de lavagem contra corrente ou de enchimento, pois os precipitadores hidrodinâmicos operam com elevadas velocidades promovendo a transferência de massa e energia através de centenas de perfurações venturi no perímetro de seu rotor conforme detalhe da figura 5, ou seja é a junção da força centrífuga com o efeito multiventuri na maximização da conversão das reações de neutralização requeridas.

O emprego de tecnologias mais eficientes permite operar com sistemas compactos de exaustão e tratamento dos vapores amoniacaís viabilizando instalações urbanas.

A demanda de vazão de ar para fins de remoção de calor é atendida pelo sistema operando a seco, e, em caso de atuação dos detectores de amônia, o circuito hidráulico ácido(calibrado em pH = 5,5) é acionado, promovendo a reação clássica de base + ácido > sal+ água, onde inovou-se pelo emprego do ácido cítrico, produto menos agressivo e estável, apesar de um custo maior que os ácido clorídrico 33% ou sulfúrico 98% , ambos escolhas de primeira opção.

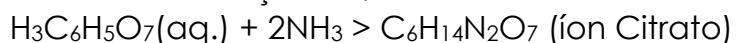
Figura 5 – Precipitador Hidrodinâmico operando no controle de vapores



Fonte: Laboratório Farmacêutico – Itapira, 2019

Neste ponto, ponderamos que o vazamento de amônia é esporádico e que o sistema opera durante a maior parte do tempo a seco, sem consumir nem água e nem produto químico, ou seja um sistema de ventilação para remoção da saturação térmica, Portanto o custo do agente neutralizante não é fundamental, pois seu uso será sob demanda de emergências de reduzida ocorrência. A questão mais grave do emprego de ácido clorado ou sulfurado é que as taxas de emissão de amônia são aleatórias, e a vazão de solução ácida circulante é constante graças ao controlador de pH on line, nessa condição, existe a elevada probabilidade de termos poluição secundária por emissão de cloro residual que é altamente agressivo às estruturas e aos ocupantes. As rotas químicas típicas para neutralização da amônia(NH_3) num sal solúvel e inodoro são:

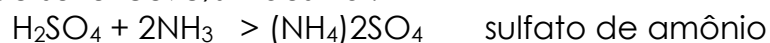
a) Ácido cítrico em solução 50%



b) Ácido clorídrico comercial 33%:



c) Ácido sulfúrico 98% industrial:



Como resultado, temos instalações urbanas em operação nos últimos cinco anos sem registro de reclamações da vizinhança, mesmo já tendo ocorrido pequenos vazamentos pontuais em válvulas e selos.

5- CONCLUSÃO

A revisão da NR36 trouxe de forma impositiva o que deveria ser uma especificação de projeto, haja vista as consequências de imagem e financeiras que um acidente possa provocar nas empresas. Em conclusão temos a necessidade de confinamento das casas de máquinas de compressores e periféricos de refrigeração base amônia, conjugados com sistema de ventilação é o tratamento do ar de forma integrada, permitindo operar em instalações mistas de processo e de conforto, com circuitos diretos e indiretos respectivamente, porém ambos com refrigeração base amônia com segurança, eficiência e ambientalmente adequado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha esposa Jane Gonçalves pela paciência, serenidade e apoio nos momentos críticos do trabalho.

REFERÊNCIAS

ASHRAE Handbook, Refrigeration, 2014, pg. 2-25/26.

Klassmann Bruna, Revista Emergência, Nov.2017, pag. 24 a 35.

Drägerwerk AG & Co. KGaA – Refrigeração com amônia ("amoniak -fa Drager"), disponível em: < www.dräger.com/voice>. Acesso em 28 abril 2023.

Eurammon,2014, disponível em:<<https://www.eurammon.com/natural-refrigerants>>. Acesso em 28 abril 2023.

FISPQ - Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos, Amônia industrial disponível em:< <https://brseguro.br-petrobras.com.br>>. Acesso em 25 abril 2023.

NR36 Norma reguladora Ministério do Trabalho - SEGURANÇA E SAÚDE NO TRABALHO EM EMPRESAS DE ABATE E PROCESSAMENTO DE CARNES E DERIVADOS, Portaria MTb n.º 1.087, de 18 de dez. de 2018.