

## **AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE FRIO ATRAVÉS DE CENTRAL DE GASES**

### **PAPER 27**

### **RESUMO**

Nas centrais de gases de segmentos industriais e hospitalares, os fluidos, em estado líquido, são armazenados em tanques criogênicos, e ao passar pelos vaporizadores atmosféricos, para que ocorra a regaseificação, fazem acumular nestes uma espessa camada de gelo, que impede a troca de calor eficiente, o que possibilita a entrada dos fluidos ainda liquefeitos na rede de distribuição, gerando danos ao sistema, aos processos e até mesmo aos pacientes, no caso do segmento hospitalar. Com o objetivo de evitar o acúmulo de gelo, normalmente é feita a remoção do mesmo utilizando-se a pressão de água de uma mangueira, até que fique completamente sem gelo. Os pontos negativos desta operação se traduzem na perda de toda água utilizada mais a provinda do derretimento do gelo. O objetivo deste estudo foi avaliar, através de técnicas de modelagem e simulação aplicadas a um estudo de caso, a utilização da água proveniente do derretimento do gelo como uma possível fonte secundária de frio para climatização de ambientes, podendo atuar em conjunto com o sistema principal de climatização, funcionando de forma simultânea ou alternada, propondo um sistema de climatização que reaproveite a água gelada que normalmente é desperdiçada e eliminando os danos que o acúmulo do gelo traz ao sistema central de gases. Os resultados encontrados apontam para um possível potencial da solução como sistema complementar de climatização. Sugere-se também uma frente experimental para trabalhos futuros.

**Palavras-chave:** Gelo. Geada. Vaporizador atmosférico. Central de Gases. Climatização.

### **ABSTRACT**

In the cryogenic gas systems of industrial and hospital segments, the fluids, in a liquid state, are stored in cryogenic tanks, and when passing through ambient air vaporizers, for regasification to occur, generates a thick layer of ice that prevents efficient heat exchange, which allows the still-liquefied fluids to enter the distribution network, generating damage to the system, to the processes and even to the patients, in the case of the hospital segment. In order to prevent ice buildup, it is usually removed using water pressure from a hose, until it is completely out of ice. The negative points of this operation are the loss of all the water used plus that coming from melting ice on the ground and in the drains. The objective of this study is to evaluate, through modeling and simulation techniques applied to a case study, the use of water from melting ice as a possible secondary source of cooling for room air-conditioning, which may act with the main air conditioning system, working simultaneously or alternately, proposing an air conditioning system that reuses the ice water that is normally wasted and eliminating the damage that ice buildup brings to the central gas plants. The results found indicate a possible potential of the solution as a complementary air conditioning system. An experimental study is also suggested for future research.

**Keywords:** Ice. Frost. Ambient Air Vaporizer. Cryogenic Gas Systems. Air Conditioning.

## 1 INTRODUÇÃO

Nas centrais de gases, os fluidos, em estado líquido, são armazenados em tanques criogênicos, e, ao passar pelos vaporizadores atmosféricos, para que ocorra a regaseificação, fazem acumular nestes uma espessa camada de gelo, que, em excesso, impede a troca de calor eficiente, o que possibilita a entrada dos fluidos ainda liquefeitos na rede de distribuição, gerando danos ao sistema, aos processos, e até mesmo aos pacientes, no caso do segmento hospitalar.

Com o objetivo de evitar o acúmulo de gelo, normalmente é feita a remoção manual diária do mesmo, utilizando-se a pressão de água de uma mangueira (Figura 1), até que fique completamente sem gelo. Ponto negativo desta operação se traduz na perda de toda água utilizada mais a provinda do derretimento do gelo pelo solo e ralos.

Estudo realizado através da Secretaria Municipal de Saúde do Estado de São Paulo no HSPM de São Paulo, objetivou a captação, utilização e reutilização de água para o descongelamento do sistema de vaporizadores dos tanques de gases medicinais (São Paulo, 2008).

A água utilizada para degelo manual das tubulações congeladas, mais a proveniente do derretimento do gelo, antes perdidas pelo solo e ralos, através de caimento no piso foi captada por grelhas e bombeada para caixas d'água superiores, e pela força da gravidade, quando a mangueira é acionada por um funcionário, a água é reutilizada para a realização do degelo, reiniciando o ciclo do sistema. Isto gerou uma redução média mensal de consumo de água de 14.476 m<sup>3</sup> para 12.593 m<sup>3</sup> e diminuição dos custos de R\$ 225.464,00 para R\$ 173.021,03 de média mensal (São Paulo, 2008).

Após o COVID-19, a demanda por oxigênio nos hospitais aumentou muito, isto fez o problema do acúmulo de gelo ocorrer em níveis extraordinários, limitando a quantidade de oxigênio que deveria chegar aos pacientes, tornando-se principal foco de publicações de alertas de segurança em revistas de associações hospitalares (Lydon, 2020), associações de gases comprimidos (CGA, 2020), revistas de público geral (*Wired*, 2020), órgãos governamentais (OSHPD, 2021) e motivando a publicação, por parte dos fabricantes, de guias de recomendações e cuidados (AIRGAS, 2020).

O objetivo deste estudo foi avaliar, através de técnicas de modelagem e simulação aplicadas a um estudo de caso, a utilização da água proveniente do derretimento do gelo como uma possível fonte secundária de frio para climatização de ambientes, podendo atuar em conjunto com o sistema principal de climatização, funcionando de forma simultânea ou alternada, propondo um sistema de climatização que reaproveite a água gelada que normalmente é desperdiçada e eliminando os danos que o acúmulo do gelo traz ao sistema central de gases. Os resultados encontrados apontam para um possível potencial da solução como sistema complementar. Sugeriu-se também uma frente experimental para trabalhos futuros.

Figura 1 – Degelo manual



Fonte: Adaptado de São Paulo, 2008, p. 7

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Stoecker (1957) foi pioneiro nos trabalhos relacionados à formação de geada, realizando um estudo experimental onde observou o seu efeito sobre o desempenho de sistemas de refrigeração. Durante o início da formação observou-se que há um ganho em até 6% do coeficiente de transferência de calor, mas logo após, uma queda do mesmo, impedindo uma troca de calor adequada, sendo, portanto, prejudicial ao sistema (apud SILVA, 2012).

Bernert (1986) estimulou o início da linha de pesquisa voltada à formação de gelo e geada em vaporizadores atmosféricos com foco aos limites impostos devido à formação de geada, que reduz o desempenho do vaporizador ao longo do tempo (apud BERNET; EVERETT; BERNET JUNIOR, 1993). Bernert (1988) verificou que ultrapassados os limites de operação estabelecidos em projeto, as camadas acumuladas puderam chegar à espessura de até 1,60 m, advertindo que somente quando projetistas e operadores reconhecessem verdadeiramente os limites, é que existiriam instalações funcionais de longo prazo. Esta observação torna-se perfeitamente compreensível ao observar os numerosos exemplos de falhas e catástrofes em detrimento do acúmulo de gelo e geada trazidos por Bernet, Everett e Bernet Junior (1993).

Liao (2007) e Carvalho (2008) abordaram a utilização do frio de regaseificação do GNL abordando aplicações que desconsideram o uso do vaporizador atmosférico e propõem o uso de trocadores de calor do tipo casco e tubo, com o GNL absorvendo calor de um fluido que tenha baixo ponto de congelamento, e este, podendo ser utilizado para aplicações de frio ou geração de energia, pois é possível a utilização para o aumento do rendimento de turbinas. Em 2013, o mercado alemão disponibilizou solução para utilização do frio de regaseificação mantendo o vaporizador no sistema, implementando difusor de frio, buffer e distribuidor, utilizando-se de um circuito de salmoura que transfere calor para o GNL e retorna para aplicação de refrigeração ou produção de gelo, normalmente, pois as temperaturas obtidas são muito baixas, em torno de  $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$  (ECOICE, 2013 e 2016). São soluções muito inexploradas até os dias de hoje, tanto no âmbito nacional, quanto internacional.

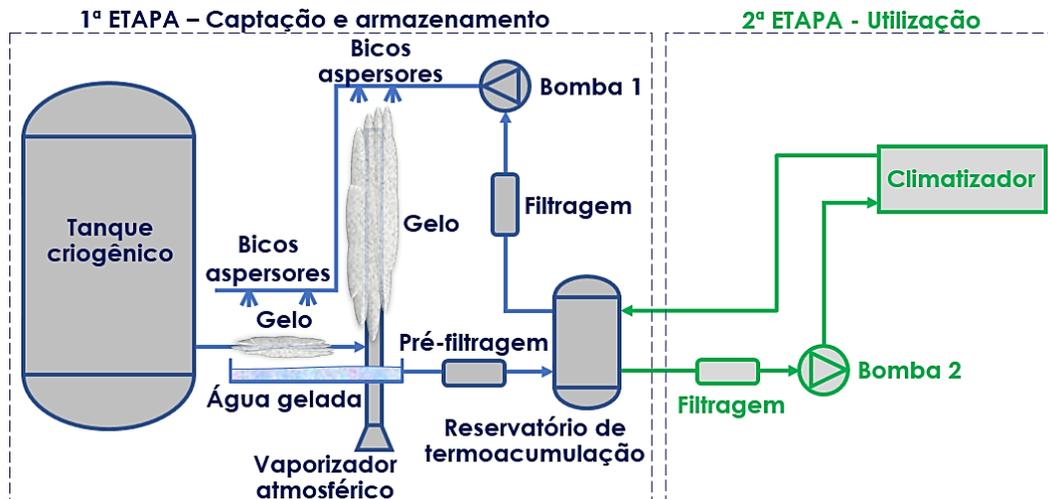
Liu *et al.* (2017) propuseram modelo matemático para prever a formação de geada em vaporizadores atmosféricos. Tendo o GNL como fluido de trabalho, apresentaram gráficos com dados da espessura de geada acumulada em todos os pontos, desde o início ao fim da tubulação, para diferentes períodos de operação, para um modelo de vaporizador atmosférico.

Jadav e Chowdhury (2021) também propuseram modelo matemático para a formação de geada em vaporizadores atmosféricos, tendo, inclusive, Liu *et al.* (2017) dentre as referências. O fluido de trabalho foi o nitrogênio, de comum presença em instalações hospitalares, junto ao oxigênio e óxido nitroso. Além disso, com condições ambientais mais próximas das encontradas no Brasil, em relação às condições do estudo de Liu *et al.* (2017), apresentando também gráfico espessura da geada ao longo de todo o comprimento para diferentes tempos de operação, o que é indispensável para o presente estudo.

### 3 CONCEPÇÃO INICIAL DO SISTEMA

Foi elaborada uma concepção inicial do sistema visando a utilização da água proveniente do derretimento do gelo em torno das tubulações e dos vaporizadores como fonte secundária de frio para climatização de ambientes. O fluxograma básico do sistema é mostrado na Figura 2:

Figura 2 – Fluxograma básico do sistema



Fonte: Elaborada pelos autores

Primeira etapa - Captação e armazenamento:

- Os bicos aspersores deverão atuar para o derretimento da camada de gelo e geada que estará em torno das tubulações e dos vaporizadores;
- Bandejas sob as tubulações e vaporizadores deverão captar a mistura da água proveniente dos bicos aspersores com a água de degelo;
- A água captada, à baixa temperatura, deverá passar por um sistema de pré-filtragem para remoção de impurezas antes que seja encaminhada para o reservatório de termoacumulação, onde ocorrerá o reinício do ciclo até que todo o gelo tenha sido removido satisfatoriamente.

Segunda etapa - Utilização:

- A água gelada, ao sair do reservatório de termoacumulação com auxílio da bomba, deverá passar por filtragem, sendo posteriormente bombeada para utilização pelo climatizador;
- Após isso, a água gelada retornará ao reservatório de termoacumulação.

Após acionado, o sistema poderá operar sem necessidade de intervenção humana, senão para a parada do sistema, após todo o degelo, o que é ponto positivo em face à solução de degelo manual (Figura 1). Apesar disso, a automatização da primeira etapa para o degelo não é necessariamente requerida para o objetivo final do sistema.

Estabelecida a concepção inicial do sistema, faz-se necessário também avaliar a viabilidade da solução através da mensuração da camada de gelo e geada a ser acumulada e do volume e temperatura da água disponível para envio ao climatizador.

#### 4 MODELO PARA PREVER A FORMAÇÃO E CRESCIMENTO DA GEADA

De acordo com Jadav e Chowdhury (2021), a formação de geada ocorre quando há contato do ar úmido com a superfície do vaporizador abaixo da temperatura do ponto de orvalho do ar, sendo formada por dessublimação ou condensação (formando gotículas que posteriormente se solidificam)

No modelo de formação de geada proposto por Jadav e Chowdhury (2021), para calcular a quantidade de congelamento depositada ao longo do tempo na superfície do vaporizador, o balanço de massa na superfície de congelamento foi realizado.

De acordo com a transferência de massa por convecção natural, a quantidade de vapor de água transferida do ar úmido para a geada se deve à diferença de concentração de vapor de água na interface ar-geada:

$$m_t = h_m(\omega_a - \omega_{fs}) \quad (1)$$

$m_t$  é o fluxo de massa de geada acumulado na superfície do vaporizador por unidade de área ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ),  $h_m$  o coeficiente de transferência de massa ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ),  $\omega_a$  é a umidade específica do ar ambiente e  $\omega_{fs}$  é a umidade específica do ar na superfície de congelamento (kg por kg de ar seco).

O coeficiente de transferência de massa  $h_m$  ( $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) é obtido a partir do coeficiente de transferência de calor pelo número de Lewis ( $Le$ ).

$$h_m = \frac{h_a}{Le^{(2/3)} c_p} \quad (2)$$

$h_a$  é o coeficiente de transferência de calor convectivo do ar em  $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$  e  $c_p$  o calor específico do ar à pressão constante em  $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ . Dependendo da temperatura da superfície de congelamento, a quantidade total de vapor de água transferida para a camada de geada pode ser dividida em duas partes: a) parte do vapor de água é depositado na superfície de congelamento e é responsável pelo aumento da espessura do congelamento ( $m_\delta$ , taxa de fluxo de massa de vapor de água aumentando a espessura da geada por unidade de área em  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ); b) o vapor restante se difunde na camada de congelamento e fica congelado nela. A segunda parte é responsável pela densificação da camada de congelamento ( $m_\rho$ , taxa de fluxo de massa de vapor de água aumentando a densidade da geada por unidade de área em  $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ):

$$m_t = m_\rho + m_\delta \quad (3)$$

$m_t$  é o fluxo de massa de geada acumulado na superfície do vaporizador por unidade de área em  $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ . A quantidade de vapor de água difundido na camada de geada por difusão molecular deve ser obtida com base em Jones e Parker (1975, apud JADAV e CHOWDHURY, 2021):

$$m_\rho = -D \frac{d\rho_v}{dx} \quad (4)$$

$D$  é o coeficiente de difusão em  $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ,  $\rho_v$  é a densidade do vapor de água em  $\text{kg m}^{-3}$  e  $x$  a distância sobre a placa ao longo da direção do fluxo de ar

em m. Assumindo que a densidade da geada é uniforme dentro da camada de geada e aplicando o balanço de energia dentro da camada de geada, uma equação diferencial de segunda ordem para o perfil de temperatura da superfície de congelamento pode ser dada como:

$$k_{fs} \frac{d^2 T}{dx^2} + \frac{m_\rho H_{sv}}{Y_{fs}} = 0 \quad (5)$$

Onde  $k_{fs}$  é a condutividade térmica da superfície da geada em  $W m^{-1} K^{-1}$ ,  $T$  a temperatura em K,  $H_{sv}$  o calor latente de desublimação em  $J kg^{-1}$  e  $Y_{fs}$  a espessura da geada em m. Ao integrar a equação acima com as condições limite como  $atx = 0$ ,  $\frac{dT}{dx} = \frac{q_{tot}}{k_{fs}}$  e  $T = T_{fn}$  (temperatura da superfície da aleta), a temperatura da superfície da geada ( $T_{fs}$ ) pode ser dada por:

$$T_{fs} = T_{fn} + \frac{q_{tot}}{k_{fs}} Y_{fs} - \frac{m_\rho H_{sv}}{2k_{fs} Y_{fs}} Y_{fs}^2 \quad (6)$$

onde  $T_{fn}$  é a média aritmética da temperatura na base e ponta das aletas (K) e o fluxo de calor,  $q_{tot} = \frac{Q_{tot}}{A_t}$  ( $W m^{-2}$ ).

A correlação para condutividade térmica ( $W m^{-1} K^{-1}$ ) e densidade da geada ( $\rho_{fs}$ ) pode ser obtida com base em Sanders (1974, apud JADAV e CHOWDHURY, 2021):

$$k_{fs} = 1,202 \times 10^{-3} \rho_{fs}^{0,963} \quad (7)$$

Para cada etapa de tempo, a mudança de espessura de gelo ( $\Delta Y_{fs(i,j)}$ ) (m) e densidade ( $\Delta \rho_{fs(i,j)}$ ) ( $kg m^{-3}$ ) são os incrementos adicionados às etapas de tempo anteriores, vide Figura 3 (onde  $H_{cr}$  é a entalpia específica criogênica em  $J kg^{-1}$ ), como segue:

$$\Delta Y_{fs(i,j)} = \frac{m_\delta \Delta t}{\rho_{fs}}, \Delta \rho_{fs(i,j)} = \frac{m_\rho \Delta t}{Y_{fs}} \quad (8)$$

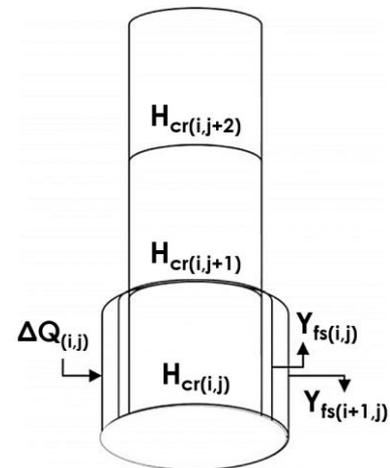
Estes valores são adicionados à espessura e à densidade da geada da etapa de tempo atual ( $i$ ) a fim de obter os valores para a etapa de tempo subsequente,

$$Y_{fs(i+1,j)} = Y_{fs(i,j)} + \Delta Y_{fs(i,j)} \quad (9)$$

$$\rho_{fs(i+1,j)} = \rho_{fs(i,j)} + \Delta \rho_{fs(i,j)} \quad (10)$$

$h_a$  é obtido em função dos valores de propriedade do ar, que são em função de  $T_{fs}$ . Além disso,  $T_{fs}$  também é obtido em função de  $h_a$ . Têm-se, portanto, equações implícitas. Deste modo, somente um processo iterativo pode encontrar soluções para estas equações.

Figura 3 – Processo de formação da geada



Fonte: Adaptado de JADAV e CHOWDHURY (2021)

## 5 AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE TÉRMICA DISPONÍVEL

### 5.1 Espessura da camada de geada a ser acumulada

A avaliação da espessura da camada de gelo e geada a ser acumulada deve ser feita para cada modelo específico de vaporizador atmosférico. Este é também referenciado, em inglês, pela sigla AAV (*Ambient Air Vaporizer*). Além disto, a avaliação deverá considerar as propriedades do fluido envolvido no processo de vaporização. Na Tabela abaixo, estão apresentados parâmetros de geometria e operação de um vaporizador atmosférico.

Tabela 1 – Os parâmetros de geometria e operação do AAV

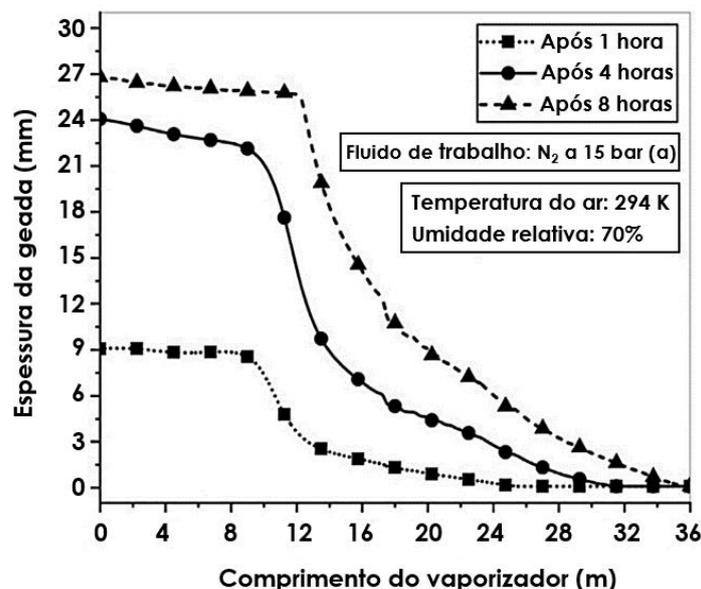
Fluido	Vazão por tubo (N·m <sup>3</sup> /h)	Pressão (bar a)	$T_{in}$ (K)	$T_a$ (K)	Nº de aletas	$D_i$ (mm)	$D_o$ (mm)	$\delta$ (mm)	H (mm)	L (m)
N <sub>2</sub>	100	15	77	294	8	21,5	26,1	2	62	36

**Nota:**  $T_{in}$  é a temperatura de entrada do Nitrogênio;  $D_i$  e  $D_o$  são os diâmetros interno e externo do tubo aletado;  $\delta$  é a espessura das aletas; H é a altura das aletas; L é o comprimento do vaporizador.

Fonte: Adaptado de JADAV e CHOWDHURY, 2021, p. 405

Jadav e Chowdhury (2021), com base no modelo matemático que propuseram para a prever a formação de geada em superfícies criogênicas (item 4), avaliaram a formação de geada para o modelo de vaporizador descrito na Tabela 1, gerando o gráfico apresentado na Figura 4. O objetivo final foi compreender os fatores que interferem no fluxo de ar ambiente pelo vaporizador, visando otimizações para uma melhor performance. No presente estudo, o objetivo é avaliação da capacidade térmica disponível a partir da massa de gelo e geada acumulada.

Figura 4 – Gráfico espessura x comprimento



Fonte: Adaptado de JADAV e CHOWDHURY, 2021, p. 405

As áreas sob as curvas geradas podem ser calculadas através da regra trapezoidal ou integrais definidas das equações geradas com base nas linhas de tendência do gráfico, com auxílio de softwares, desde que adotada a mesma unidade de medida para os eixos, ou, em caso de unidades diferentes, sejam convertidas para uma unidade comum. Esta área, dividida pelo comprimento total da tubulação, fornece a espessura média da camada de geada acumulada, ou seja, o valor fixo da espessura caso a geada fosse acumulada de maneira uniforme do início ao fim da tubulação. Utilizando-se do perfil gerado para 8h de funcionamento, mostrado na Figura 4, o valor médio da espessura acumulada equivale a aproximadamente 13,53 mm a cada 8h de operação.

O volume total acumulado será dado pela equação a seguir:

$$V_a = (\pi R_{totm}^2 - \pi R_{ext}^2) \cdot L \quad (11)$$

onde  $V_a$  é o volume total acumulado de geada,  $R_{totm}$  é o raio total médio da tubulação (incluindo a geada acumulada),  $R_{ext}$  é o raio externo do tubo e  $L$  é o comprimento total da tubulação. Ambos os raios estão identificados na Figura 5.

Desta forma, para o vaporizador especificado na Tabela 1, com um tempo de operação de 8h, tubulação de raio externo igual a 13,05 mm, raio total médio (raio da tubulação + espessura média da geada) igual a 26,58 mm e 36 metros de comprimento total da tubulação, têm-se um volume total acumulado de 0,06064 m<sup>3</sup>.

Para obtenção da massa disponível, é necessário, ainda, considerar a porosidade da geada. Silva (2012) afirma que o gelo apresenta uma estrutura praticamente maciça, enquanto a geada apresenta uma estrutura porosa, formada por cristais de gelo irregulares, com estrutura normalmente dendrítica ou fractal, e pequenas bolsas de ar.

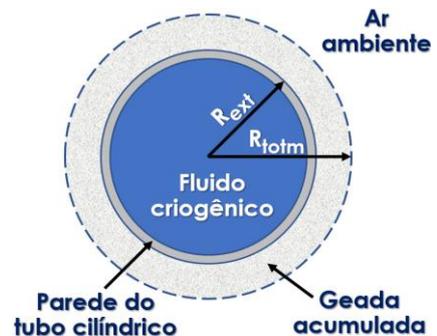
A densidade da geada ( $\rho_{fs}$ ) será obtida através das correlações de Liu (2017), onde  $\psi$  é a porosidade da geada,  $T_{fs}$  a temperatura de superfície da geada,  $\rho_{ice}$  a densidade do gelo e  $\rho_a$  a densidade do ar.

$$\psi = 1 - 0,71 \exp[0,228(T_{fs} - 273,15)] \quad (12)$$

$$\rho_{fs} = (1 - \psi)\rho_{ice} + \psi\rho_a \quad (13)$$

Foram adotadas temperatura de superfície da geada ( $T_{fs}$ ) igual a 268,15 K (-5° C), densidade padrão do gelo ( $\rho_{ice}$ ) igual a 917 kg/m<sup>3</sup> e densidade do ar a 21 °C (294 K) e 1 atm ( $\rho_a$ ) igual a 1,201 kg/m<sup>3</sup>. Desta forma, a densidade da geada calculada e adotada para os cálculos subsequentes foi de 209,16 kg/m<sup>3</sup>, sendo, a massa de geada disponível a partir do volume total acumulado (0,06064 m<sup>3</sup>), de 12,68 kg.

Figura 5 – Acúmulo de gelo e geada ao redor do tubo



Fonte: Elaborada pelos autores

## 5.2 Temperatura e volume da água disponível

Para obtenção da temperatura e volume da água disponível, assumiu-se aqui que a água proveniente do derretimento da geada não interage em termos de transferência de calor com o ar ambiente, devido ao pouco tempo em que esta permanecerá na bandeja de coleta antes de ser encaminhada ao reservatório de termoacumulação.

Através dos cálculos a seguir será encontrado o volume de água para o derretimento satisfatório do gelo e geada acumulados. Além disso, serão encontradas também a temperatura e volume da mistura final, obtida após o completo derretimento do gelo e geada. Para isso, utilizou-se a equação fundamental da calorimetria para o calor sensível e equação do calor latente.

Inicialmente é preciso calcular a quantidade de calor necessária para o gelo chegar a 0° C, com base na equação para o calor sensível:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t = 12680 \cdot 0,5 \cdot (0 - (-5)) = 31700 \text{ cal} \quad (14)$$

E então a quantidade de calor necessária para derretimento do gelo, calculada com base na equação para o calor latente:

$$Q = m \cdot L = 12680 \cdot 80 = 1\,014\,400 \text{ cal} \quad (15)$$

Isto nos fornece uma quantidade total de calor para remover o gelo satisfatoriamente igual a 1 046 100 cal, que deverá ser cedida pela água, sendo a massa mínima de água para o derretimento total do gelo calculada com base na equação para o calor sensível:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \rightarrow -1\,046\,100 = m \cdot 1 \cdot (0 - 21) \rightarrow [m \cong 49814 \text{ g}] \quad (16)$$

A massa mínima necessária de água para o total derretimento do gelo (49814 g) somada à massa do gelo (12680 g) fornece um total de 62494 g, o equivalente a um volume de aproximadamente 62,5 L, que estará a 0° C.

Diferentemente de uma mistura ocorrida em um calorímetro ideal, onde o contato entre as partes ocorre por inteiro de forma estática e permanente, para que ocorra o total derretimento, um único contato deste volume pulverizado pelos bicos aspersores não será o suficiente, de modo que o volume a ser circulado até o derretimento do gelo será maior que o volume de 62,5 L. Isto significa que mais importante que o próprio volume, é o volume circulado, o que permite conceber um sistema com um volume total de água superior a 62,5 L, tendo um maior volume disponível, conseqüentemente, possibilitando maiores vazões de água, desde que a temperatura final da mistura água-gelo não ultrapasse a temperatura desejada para a aplicação de climatização, aqui adotada como 7 °C. O volume de água possível de ser acrescido será calculado pela equação do equilíbrio térmico:

$$\Sigma Q = 0 \rightarrow m \cdot 1 \cdot (7 - 21) + 62494 \cdot 1 \cdot (7 - 0) = 0 \rightarrow [m = 31247 \text{ g}] \quad (17)$$

O volume máximo total do sistema para obtenção de uma temperatura final de 7° C será dado pela soma das massas de 62494 g e 31247 g, sendo igual a 93741 g, o equivalente a um volume de aproximadamente 93,7 L, que estará a 7 °C. É importante notar que após um primeiro acionamento, a temperatura da água aspergida não estará mais à temperatura ambiente, como considerado no cálculo, mas sim igual a temperatura de retorno do climatizador, considerando idealmente que não haverá aumento de temperatura da água armazenada até a próxima utilização. Se a temperatura for igual a 12,5° C, maximiza em muito a capacidade de volume total do sistema, mantendo a temperatura final desejada de 7 °C, como mostrado a seguir:

$$\sum Q = 0 \rightarrow m \cdot 1 \cdot (7 - 12,5) + 62494 \cdot 1 \cdot (7 - 0) = 0 \rightarrow [m \cong 79538 \text{ g}] \quad (18)$$

Somando as massas calculadas de 62494 g e 79538 g, têm-se um total de 142032 g. Em volume, aproximadamente 142 L, que estará a 7 °C.

### 5.3 Capacidade térmica disponível

A capacidade térmica disponível é dada pela equação fundamental da calorimetria para o calor sensível, onde  $\dot{Q}$  é a capacidade térmica em kcal/h,  $\dot{m}$  é a vazão do fluido em m<sup>3</sup>/h,  $c$  é o calor específico do fluido e  $\Delta t$  a diferença de temperatura entre a alimentação e retorno do fluido.

Para uma capacidade térmica de 7000 BTU/h ou 1765 kcal/h, com base na equação para o calor sensível, adotando o calor específico da água e um diferencial de temperatura de 5,5 °C, faz-se necessária uma vazão volumétrica de 0,32 m<sup>3</sup>/h ou 0,1 L/s. Esta vazão será utilizada para avaliar o potencial da solução por ser uma situação de mínima utilização, pequenos ambientes, de modo a entender se é, em algum caso, viável.

O volume máximo da mistura sem que a sua temperatura ultrapasse 7 °C foi calculado no item 5.2 e corresponde a 142 L, o que limita o volume total do sistema a este valor, para manutenção da temperatura desejada, de modo que, adotada a vazão de 0,1 L/s, o volume de água poderia ser utilizado, circulando por completo pela serpentina do climatizador em aproximadamente 23 minutos e meio.

## 6 SUGESTÃO DE FRENTE EXPERIMENTAL

Primeiramente, é necessário identificar o tempo máximo de operação de cada vaporizador sem que haja necessidade de intervenção para o derretimento do gelo e geada acumulados. Isto poderá ser feito através da consulta às recomendações de operação para cada modelo e fabricante, se indicado o tempo máximo de operação ininterrupta.

Apresenta-se como opção a verificação experimental dos parâmetros operativos da tubulação de saída da central de gases, de modo a identificar qual o tempo máximo possível de operação antes que os parâmetros de saída comecem a ser afetados de maneira significativa. Tendo o tempo máximo

possível de operação sem necessidade de intervenção, têm-se também o maior volume acumulado possível sem que haja prejuízos e danos ao sistema.

Posteriormente, um degelo manual pode ser feito, considerando a captação de toda a água proveniente do derretimento do gelo e geada. Esta deve ser captada e encaminhada para um reservatório isolado termicamente. Ao final da operação de degelo, será possível identificar o volume e temperatura da água captada.

Com estes dados, é possível avaliar a capacidade térmica disponível. Esta será indicativo da possibilidade ou não do uso para fins de climatização. É importante que seja monitorado o volume de água utilizado, isto permitirá conhecer a parcela de contribuição no volume final por parte do gelo e geada, contribuindo também para comparações dos resultados experimentais com os métodos para modelagem do sistema. Além disso, irá maximizar a possibilidade do surgimento de correlações empíricas.

## 7 CONCLUSÕES

Considerando que a etapa de degelo já se faz necessária para o funcionamento adequado da central de gases, os resultados encontrados apontam para um possível potencial da solução como sistema complementar de climatização, reduzindo a carga térmica a ser removida pelo sistema principal. Registros fotográficos mostram que mesmo em condições normais de demanda, as camadas de gelo e geada comumente encontradas são notoriamente mais espessas que a maior espessura prevista no estudo de caso (Figuras 1 e 6), tendo este volume de gelo e geada acumulado sido ainda maior durante a pandemia do COVID-19 devido ao aumento da demanda de oxigênio nas instalações hospitalares (Figura 7). A espessura da camada de gelo e geada está intrinsecamente atrelada à demanda requerida e ao tempo máximo de operação do vaporizador, que será individual para cada modelo e aplicação. Sugere-se então, uma frente experimental que possa avaliar o tempo máximo de operação e a capacidade térmica disponível de modo prático, permitindo avaliar a potencialidade desta solução caso a caso.

Figura 6 – Vaporizador atmosférico hospitalar em tempos normais de demanda



Fonte: HSDL, 2014

Figura 7 – Vaporizador atmosférico hospitalar durante a pandemia do COVID-19. A imagem mostra o mesmo equipamento coberto por uma camada espessa de gelo e geada, com um sinal de advertência 'OXYGEN NO SMOKING NO OPEN FLAMES' visível na grade de proteção.



Fonte: WIRED, 2020

## REFERÊNCIAS

- AIRGAS. **COVID-19 Readiness: Bulk Hospital Vaporizer Guidance**, 2020. Disponível em: <<https://www.gnyha.org/wp-content/uploads/2020/04/EPB-2020-033-attachment.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- BERNERT, R. E. Further remarks on the limitations of ambient vaporizers in continuous operation. **Proceedings of the Twelfth International Cryogenic Engineering Conference Southampton**, Reino Unido, p. 351-354, jul. 1988.
- BERNERT, R. E.; EVERETT, W.; BERNERT, R. E. Cryogenic ambient air vaporizers: frost growth, wind and seismic design for safety. **Cryogenics**, Reino Unido, v.33, n. 8, p. 789-793, ago. 1993.
- CARVALHO, É. C. **Avaliação técnica-econômica do armazenamento, transporte e regaseificação do gás natural liquefeito**. 2008. 82 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.
- CGA – Compressed Gas Association. **Medical oxygen supply system issues during the covid-19 crisis**, 2020. Disponível em: <[https://portal.cganet.com/pubs/free/SA-37\\_1.pdf](https://portal.cganet.com/pubs/free/SA-37_1.pdf)>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- ECOICE. **Gélida poupança**, 2013. Disponível em: <[http://www.eco-ice.net/wp-content/uploads/2013/10/Ing\\_flyer\\_port\\_web.pdf](http://www.eco-ice.net/wp-content/uploads/2013/10/Ing_flyer_port_web.pdf)>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- ECOICE. **Princípio de funcionamento do sistema de regaseificação**, 2016. Disponível em: <<http://www.eco-ice.net/pt/kaelte-aus-erdgas/regasifizierung-wirkprinzip/>>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- HSDL – Homeland Security Digital Library. **Coffee Break Training: Hazardous Materials: Cryogenic Liquid Vaporizers**. Disponível em: <<https://www.hsdl.org/?abstract&did=752951>>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- JADAV, C.; CHOWDHURY, K. Minimizing weight of ambient air vaporizer by using identical and different number of fins along the length. **Renewable Energy**, Reino Unido, v.163, p. 398-413. jan. 2021.
- LIAO, P. W. S. **Utilização da energia “fria” de regaseificação do gás natural liquefeito em outras aplicações**. 2007. 98 f. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- LIU, S. *et al.* Dynamic Heat Transfer Analysis of Liquefied Natural Gas Ambient Air Vaporizer under Frost Conditions. **Applied Thermal Engineering**, Reino Unido, v.110, p. 999-1006, jan. 2017.
- LYDON, Edmund. Bulk medical oxygen systems: How the COVID-19 crisis can impact med-gas infrastructure. **Health Facilities Management**, 2020. Disponível em: <<https://www.hfmmagazine.com/articles/3910-bulk-medical-oxygen-systems>>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- OSHPD – Office Statewide Health Planning and Development. **Health facility medical oxygen systems best practices during covid-19 pandemic**, 2021. Disponível em: <<https://oshpd.ca.gov/wp-content/uploads/2021/01/OSHPD-Oxygen-Systems-Guide-1.pdf>>. Acesso em: 05 mai. 2021.
- SÃO PAULO, Secretaria Municipal de Saúde, Hospital do Servidor Público Municipal. **Captação, utilização e reutilização de água para o descongelamento do sistema de evaporador dos tanques de gases medicinais**. São Paulo, 2008.
- SILVA, D. L. **Análise da formação de gelo e geada e seu efeito no desempenho termo-hidráulico de evaporadores do tipo tubo aletado**. 2012. 173 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- WIRED. **The Cold, Hard Work of Delivering Oxygen to Ventilators**, 2020. Disponível em: <<https://www.wired.com/story/cold-hard-work-delivering-oxygen-ventilators/>>. Acesso em: 05 mai. 2021.