



**Proposta de sistema de refrigeração por absorção acionado por gases de escape de diesel geradores para produção de gelo na Amazônia**  
*Proposal for an absorption refrigeration system driven by exhaust gases from diesel generators for ice production in the Amazon*

Lucas Figueiredo Vinent<sup>1</sup>, Vicente Moreira Rodrigues<sup>2,\*</sup>

<sup>1</sup> Aluno do Programa de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Oeste do Pará – Ufopa, campus Santarém, PA, Brasil

<sup>2</sup> Professor do Programa de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal do Oeste do Pará – Ufopa, campus Santarém, PA, Brasil

\*Autor para correspondência, E-mail: [vicente.rodrigues@ufopa.edu.br](mailto:vicente.rodrigues@ufopa.edu.br)

Received: 11 October 2022 | Accepted: 16 November 2022 | Published online: 24 December 2022

**Resumo:** A escassez de energia elétrica sempre foi uma realidade na Amazônia e as comunidades ribeirinhas o maior exemplo dessa conjuntura. Nessas localidades o suprimento energético se dá basicamente em diesel geradores; e uma das principais atividades econômicas é a comercialização do pescado, que tem como principal meio conservante dos pontos de captura e venda o gelo, e sendo este produzido por um ciclo que consome eletricidade de forma intensiva, sua fabricação se torna praticamente inviável nas comunidades devido ao alto consumo de combustível exigido. Neste contexto, o presente trabalho propõe uma ferramenta de análise termodinâmica com base na primeira lei para projetar uma tecnologia alternativa para produzir gelo: os sistemas de refrigeração por absorção, tendo como fonte quente o rejeito térmico (escape) de moto geradores presentes nas comunidades. Dessa forma uma parcela significativa de eletricidade pode ser utilizada para outra finalidade. Balanços de massa, energia e concentração são modelados pelo autor, e através do software *Engineering Equation Solver* (EES) as propriedades não explícitas foram determinadas, evitando-se assim recorrer aos gráficos imprecisos, ao final chega-se a um sistema linear de equações que é resolvido no software Microsoft Excel® a fim de encontrar as variáveis de interesse. O ciclo proposto atingiu a temperatura de  $-18^{\circ}\text{C}$ , que é adequada à produção de gelo, e para uma operação de 24 horas do diesel gerador estimou-se que seriam produzidos aproximadamente 250 kg de gelo consumindo uma quantidade ínfima de eletricidade na bomba. Conforme apresentado o trabalho atestou de forma teórica a possibilidade de aproveitamento de escape para produção de gelo e ainda estimou a quantidade deste que seria produzida, mostrando assim a possibilidades dos sistemas de refrigeração por absorção em regiões remotas, como as comunidades ribeirinhas na Amazônia. Palavras-chave: refrigeração por absorção, pescado, gelo, escape, comunidade ribeirinhas.

**Abstract:** The present work proposes a thermodynamic analysis tool to design absorption refrigeration systems having as a hot source thermal waste from ship engines or motor-generators that supply electricity in riverside communities in the Amazon. The scarcity of electric energy in this region is a limiting factor in the conservation of fish, usually done with the use of ice, and since this is produced by a cycle that consumes electricity intensively, a viable alternative can be introduced, allowing the use of electric energy to another purpose. In this context, the analysis based on first law of thermodynamics is made for an absorption refrigeration system driven by exhaust from diesel generators. Mass, energy, and concentration balances were modeled by the author, through the *Engineering Equation Solver* (EES) software, the non-explicit properties were determined, thus avoiding resorting to imprecise diagrams, in the end, a linear system of equations that is solved in Microsoft Excel® software to find the variables of interest. The work attested, in accordance with the first law of conservation of thermodynamics, to the possibility of using exhaust and also estimated the amount of ice that would be produced.

**Keywords:** absorption cooling, fish, ice, exhaust, riverside community.

## 1. Introdução

A escassez de energia elétrica sempre foi uma contingência na Amazônia, seja por suas dimensões continentais ou pela falta de políticas efetivas para solucionar o problema, nos últimos anos esforços como programas governamentais, linhas de distribuição de energia das grandes hidrelétricas para locais remotos, e o uso de painéis solares foram soluções propostas. A tecnologia consolidada e mais utilizada nas comunidades ribeirinhas para suprir a demanda por energia elétrica são os moto geradores, caracterizados por sistemas de pequeno porte cuja geração associada é próxima a 6 kW (Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS, 2019).

A Figura 1 apresenta o mapa dos sistemas de distribuição de eletricidade que atendem o País: o Sistema Interligado Nacional (SIN) e os Sistemas Isolados (SISOL), observa-se que na região norte está a maior parte de sistemas isolados cuja conversão principal se dá através de queima de diesel, cuja geração é tida como cara devido aos custos com combustíveis e transporte (Cunha et al., 2018).



Figura 1. Presença de SISOLs na região norte. Fonte: Adaptado de ONS (2022).

Uma das principais atividades econômicas nas comunidades ribeirinhas é o comércio de pescado, que contribui com a subsistência, respondendo por 57% do total que é pescado na Amazônia, e com a geração de emprego, cerca de 95% no setor pesqueiro (Almeida et al., 2006 cited in Lima, 2020, p.22). Sendo a região do Baixo Amazonas, que compreende desde a foz do rio Madeira até a foz do rio Xingu, uma grande produtora de pescado na região Norte (Ferreira, 2018).

Na Figura 2 é mostrado o pescado sendo comercializado no município de Oriximiná, nota-se que o principal meio conservante dos pontos de captura e comércio utilizado pelos pescadores é o gelo. Para atender a demanda por gelo as fabricantes regionais utilizam o sistema de refrigeração por compressão de vapor (SRCV) que consome eletricidade de forma massiva (Campos, 2017; Nascimento, 2011), e sendo esta do ponto de vista da termodinâmica uma forma nobre que tem origem em sua maioria de fontes não renováveis, é de interesse propor um sistema alternativo com consumo energético reduzido, que contribua com uso racional de eletricidade em uma região onde a escassez deste recurso é realidade (no contexto dos sistemas isolados).

Neste sentido, o presente trabalho trata do estudo e análise com base na primeira lei da termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção (SRA) acionado por gases quentes (escape) de diesel geradores baseado no par de trabalho amônia-água. Balanços de massa, energia e concentrações para cada dispositivo foram realizados pelo autor e, com auxílio do software Engineering Equation Solver (EES) determinaram-se as propriedades que não estavam explícitas, evitando-se assim os diagramas imprecisos de entalpia-concentração. Com hipóteses e considerações de engenharia, um sistema linear de equações é encontrado, cuja solução se deu no software Microsoft Excel®, as variáveis de interesse foram determinadas e o Coeficiente de Performance (COP) foi calculado. Com a carga térmica no evaporador pode-se calcular a

quantidade de gelo a ser produzida, o resultado mostrou que é possível de acordo com a primeira lei da termodinâmica acionar um SRA por escape de diesel geradores.



Figura 2. Comércio do pescado em Oriximiná, no oeste do estado do Pará.

## 2. Histórico dos sistemas de refrigeração por absorção

A tecnologia de refrigeração por absorção é anterior a do sistema de refrigeração por compressão de vapor, a mais utilizada na atualidade, e os sistemas baseados no par amônia-água são amplamente utilizados em refrigeração industrial (Marques, 2010). A construção do primeiro dispositivo a operar segundo a tecnologia de absorção se atribui a Ferdinand Carré nos Estados Unidos, no ano de 1920 na Suécia data o primeiro refrigerador de uso doméstico baseado na tecnologia de absorção (Napoleão, 2003).

Esses sistemas funcionam geralmente com um par de trabalho, o refrigerante e o absorvente, os dois pares mais utilizados são Brometo de Lítio-água e Amônia-água, o primeiro consiste em um sólido e fluido, e o segundo em dois fluidos (Nascimento, 2011).

A solução binária brometo de lítio-água é utilizada em dispositivos de condicionamento de ar devido o fluido refrigerante, a água, operar em temperaturas na ordem de 5 °C, o que não é indicado por exemplo, para produção de gelo, como há separação total do refrigerante e absorvente o ciclo não requer equipamentos adicionais (Oliveira, 2015 *apud* Campos, 2017). No segundo par o refrigerante é a amônia e o absorvente a água, a depender da pressão de operação do evaporador o refrigerante pode atingir temperaturas na ordem de -77 °C, o que torna possível conservar alimentos e produzir gelo, além de outras finalidades. Porém, devido não ocorrer separação total entre os vapores de amônia e água necessita-se de dispositivos adicionais tornando a configuração mais robusta (Moran e Shapiro, 2012).

### 2.1 Diagrama entalpia-concentração

O diagrama Entalpia-Concentração é o mais utilizado pois permite a representação dos estágios que a solução binária passa nos dispositivos, este gráfico é construído a partir de correlações matemáticas e dados experimentais, a Figura 3 apresenta um desses diagramas cuja autoria é dada a Merkel-Bosnjakovic (Menna, 2008). As regiões de vapor superaquecido, saturado, líquido saturado e subresfriado são estabelecidas com a ajuda de linhas auxiliares e mais três propriedades obedecendo a regra de Gibbs para misturas (Kuehn et al., 1970).

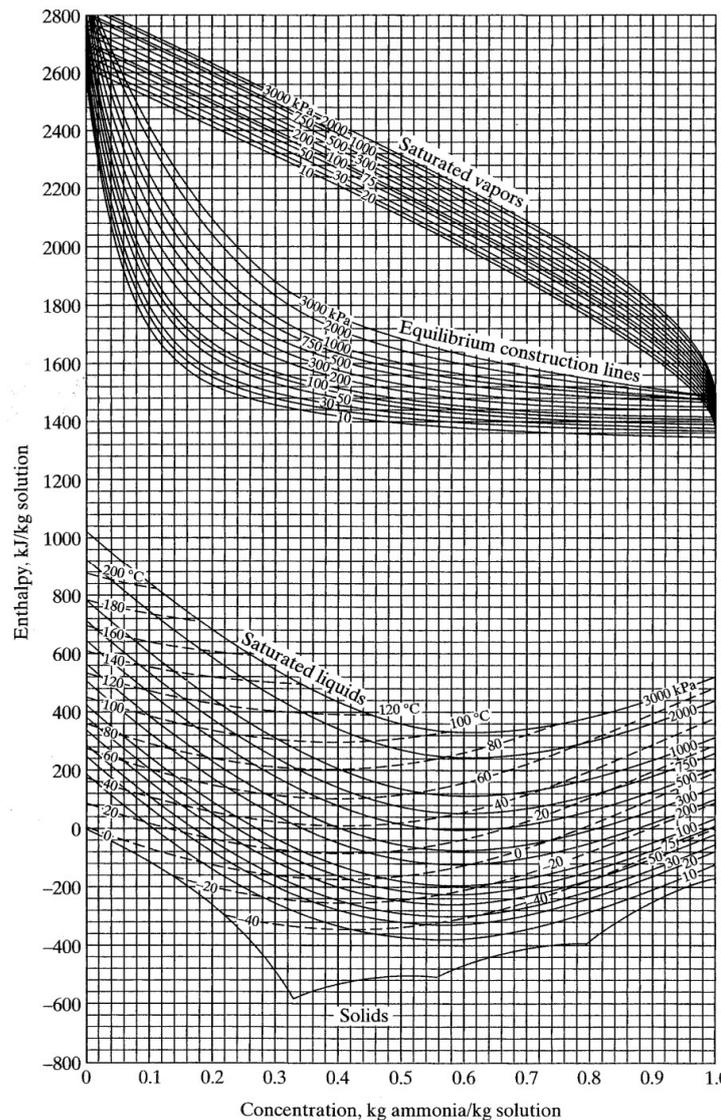


Figura 3. Diagrama Entalpia-Concentração para misturas amônia-água. Fonte: Kuehn et al. (1970)

### 3. Sistema de refrigeração por absorção baseado no par amônia-água

O presente trabalho apresentará um sistema baseado no par amônia-água, na Figura 4 é mostrado uma das configurações para este par, que servirá para a modelagem do trabalho. Inicialmente o refrigerante líquido encontra-se no evaporador, ao receber calor do espaço a ser refrigerado vaporiza e devido a diferença de pressões parciais segue até o absorvedor, processo (11)-(12) na Figura 4, neste uma solução contendo água e amônia absorve os vapores em uma reação exotérmica, sendo necessário um mecanismo de resfriamento, pois a quantidade de vapor a ser absorvido é inversamente proporcional a temperatura do absorvedor (Çengel e Boles, 2013).

Do absorvedor tem-se a solução líquida forte em refrigerante que segue para a bomba onde há elevação da pressão para a do condensador, processo (1)-(2), esta solução viaja para a coluna de retificação, processo (2)-(3), e vaporiza com o calor inserido no gerador vindo do escape de um diesel gerador, passa pelo deflegmador e chega no condensador (7), neste há rejeição de calor para o ar circundante, e os vapores retornam ao estado líquido (8), devido a diferença de pressão existente entre o condensador e evaporador uma válvula de expansão é utilizada, processo (9)-(10), no gerador restou a chamada solução fraca em refrigerante que retorna ao absorvedor após passar pelo registro de estrangulamento, processo (5)-(6).

A presença do trocador de calor 1 tem o objetivo de aquecer o vapor ascendente do evaporador em (11)-(12) e resfriar o líquido vindo do condensador em (8)-(9), ou seja, o líquido rejeita calor no vapor. Da mesma forma o trocador de calor 2 atua como “resfriador” da solução líquida fraca em (4)-(5) e fornece aquecimento adicional a solução líquida forte em (2)-(3), diminuindo assim, a necessidade de calor a ser fornecida ao gerador e reduzindo a temperatura da solução que absorverá o vapor vindo do evaporador.

O arranjo que compreende gerador-coluna de retificação-deflegmador é uma característica do ciclo que trabalha com o par amônia-água. A solução ao ser aquecida no gerador liberará vapores das duas substâncias e a presença de água no refrigerante tem três efeitos negativos (Arora, 2013, p. 436):

- (i) A pressão do evaporador deve ser reduzida para atingir a temperatura de refrigeração necessária;
- (ii) O trabalho da bomba aumenta e o COP reduz;
- (iii) A evaporação não é completa e todo o líquido não evapora, comprometendo o efeito de refrigeração (evaporador).

A fim de minimizar esses efeitos adiciona-se uma coluna de retificação visando o aumento de concentração de amônia nos vapores através do contato entre a solução rica e o vapor, um segundo refinador é o deflegmador que funciona de forma semelhante a coluna, com a diferença de retirar calor dos vapores, a fim de condensar a água e vaporizar mais amônia.

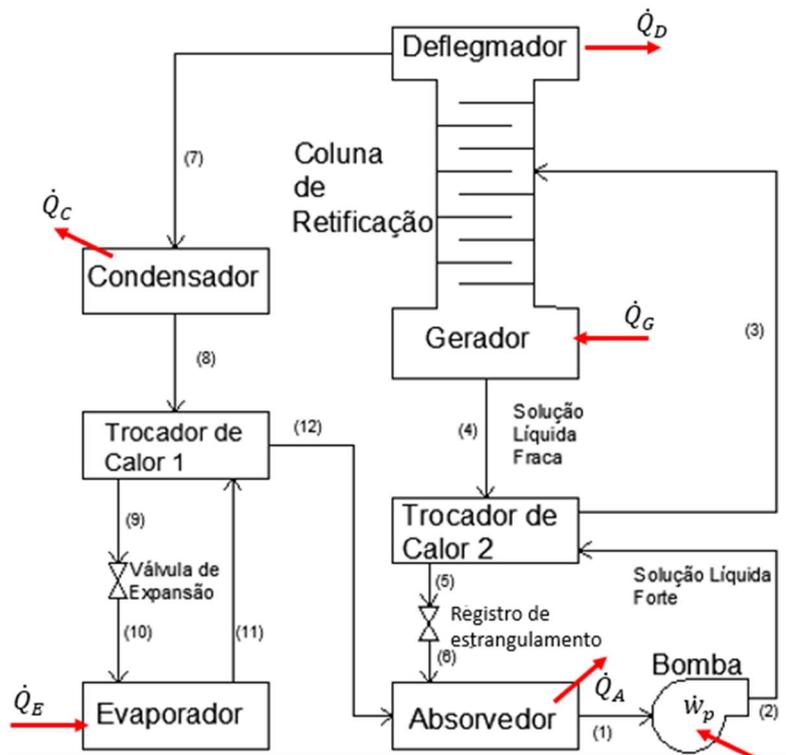


Figura 4. Sistema de refrigeração por absorção proposto. Fonte: Adaptado de Kuehn et al. (1970)

#### 4. Modelo matemático

Nesta seção serão apresentados os balanços de energia, massa e concentrações efetuados nos dispositivos. Os termos  $\dot{m}$ ,  $h$ ,  $\xi$ ,  $\dot{Q}$  e  $\dot{w}$  referem-se a vazão mássica, entalpia, concentração em termos de amônia, taxa de calor e taxa de trabalho, respectivamente. Assumiram-se as seguintes hipóteses e considerações.

- 1) O sistema opera em regime permanente;
- 2) Perda de carga desprezíveis nas tubulações;
- 3) Eficiência isentrópica da bomba de 85%;
- 4) Temperatura e aporte térmico conhecidos no gerador;
- 5) Trocadores de calor adiabáticos;
- 6) Variações de temperatura entre os estados de entrada e saída nos trocadores de calor 1 e 2 conhecida (10 °C);
- 7) Definida a concentração de vapor saindo do deflegmador;
- 8) Válvula de expansão e registro de estrangulamento são considerados isoentálpicos.

A Tabela 1 mostra as propriedades conhecidas e aquelas que serão determinadas (em traço). As pressões do lado de alta (condensação) e baixa (evaporação), bem como temperatura, estados saturados e concentração na saída do deflegmador foram consultadas em Kuehn et al. (1970).

Tabela 1. Variáveis de entrada do sistema de refrigeração por absorção proposto.

Estado	x	P(kPa)	T(°C)	$\xi$	h(kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)
1	0	206,8	-	-	-	-
2		1379	-	-	-	-
3	0	1379	93,35	-	-	-
4	0	1379	115,55	-	-	-
5		1379	-	-	-	-
6		206,8	-	-	-	-
7	1	1379	-	0,9979	-	-
8	0	1379	-	-	-	-
9		1379	-	-	-	-
10		206,8	-	-	-	-
11		206,8	-	-	-	-
12	1	206,8	-	-	--	-

Evaporador

$$\dot{m}_{11}h_{11} = \dot{m}_{10}h_{10} + \dot{Q}_E \quad (1)$$

$$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{10} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{11}\xi_{11} = \dot{m}_{10}\xi_{10} \quad (3)$$

Trocador de Calor 1

$$\dot{m}_8h_8 + \dot{m}_{11}h_{11} = \dot{m}_9h_9 + \dot{m}_{12}h_{12} \quad (4)$$

$$\dot{m}_8 + \dot{m}_{11} = \dot{m}_9 + \dot{m}_{12} \quad (5)$$

$$\dot{m}_8\xi_8 + \dot{m}_{11}\xi_{11} = \dot{m}_9\xi_9 + \dot{m}_{12}\xi_{12} \quad (6)$$

Absorvedor

$$\dot{m}_1h_1 + \dot{Q}_A = \dot{m}_{12}h_{12} + \dot{m}_6h_6 \quad (7)$$

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_{12} + \dot{m}_6 \quad (8)$$

$$\dot{m}_1\xi_1 = \dot{m}_{12}\xi_{12} + \dot{m}_6\xi_6 \quad (9)$$

Bomba

$$\dot{m}_2h_2 = \dot{w}_P + \dot{m}_1h_1 \quad (10)$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1 \quad (11)$$

$$\dot{m}_2\xi_2 = \dot{m}_1\xi_1 \quad (12)$$

Trocador de Calor 2

$$\dot{m}_3h_3 + \dot{m}_5h_5 = \dot{m}_2h_2 + \dot{m}_4h_4 \quad (13)$$

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_5 = \dot{m}_2 + \dot{m}_4 \quad (14)$$

$$\dot{m}_3\xi_3 + \dot{m}_5\xi_5 = \dot{m}_2\xi_2 + \dot{m}_4\xi_4 \quad (15)$$

Conjunto Gerador-Coluna de Retificação-Deflegmador

$$\dot{m}_7h_7 + \dot{m}_4h_4 + \dot{Q}_D = \dot{m}_3h_3 + \dot{Q}_G \quad (16)$$

$$\dot{m}_7 + \dot{m}_4 = \dot{m}_3 \quad (17)$$

$$\dot{m}_7\xi_7 + \dot{m}_4\xi_4 = \dot{m}_3\xi_3 \quad (18)$$

Registro de estrangulamento

$$\dot{m}_5h_5 = \dot{m}_6h_6 \quad (19)$$

$$\dot{m}_5 = \dot{m}_6 \quad (20)$$

$$\dot{m}_5\xi_5 = \dot{m}_6\xi_6 \quad (21)$$

Condensador

$$\dot{m}_8h_8 + \dot{Q}_C = \dot{m}_7h_7 \quad (22)$$

$$\dot{m}_8 = \dot{m}_7 \quad (23)$$

$$\dot{m}_8\xi_8 = \dot{m}_7\xi_7 \quad (24)$$

Válvula de expansão

$$\dot{m}_{10}h_{10} = \dot{m}_9h_9 \quad (25)$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_9 \quad (26)$$

$$\dot{m}_{10}\xi_{10} = \dot{m}_9\xi_9 \quad (27)$$

Observando o ciclo verifica-se que ocorrem três fluxos de vazões mássicas e de concentrações, neste caso, pode-se escrever:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 = \dot{m}_3 = \dot{m}_{LS} \text{ (vazão mássica de solução forte)} \quad (28)$$

$$\dot{m}_4 = \dot{m}_5 = \dot{m}_6 = \dot{m}_{LW} \text{ (vazão mássica de solução fraca)} \quad (29)$$

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 = \dot{m}_9 = \dot{m}_{10} = \dot{m}_{11} = \dot{m}_{12} = \dot{m}_{LS} \text{ (vazão mássica de refrigerante)} \quad (30)$$

$$\xi_1 = \xi_2 = \xi_3 = \xi_{LS} \text{ (concentração de solução líquida forte)} \quad (31)$$

$$\xi_4 = \xi_5 = \xi_6 = \xi_{LW} \text{ (concentração de solução líquida fraca)} \quad (32)$$

$$\xi_7 = \xi_8 = \xi_9 = \xi_{10} = \xi_{11} = \xi_{12} = \xi_R \text{ (concentração de refrigerante)} \quad (33)$$

Da consideração (8) temos:

$$h_6 = h_5 \quad (34)$$

$$h_{10} = h_9 \quad (35)$$

As Eqs. (28) a (35) permitem uma redução na quantidade de equações, observações sugerem que os balanços de massa e concentração no absorvedor e no gerador-coluna de retificação-deflegmador são idênticos e, portanto, redundantes, ou seja, para solucionar matematicamente o problema, somente as equações de massa e concentração de um dos dispositivos é considerada. Reescrevendo o sistema.

$$\dot{m}_{LS}h_1 + \dot{w}_P = \dot{m}_{LS}h_{12} \quad (36)$$

$$\dot{m}_{LS}h_3 + \dot{m}_{LW}h_5 = \dot{m}_{LS}h_2 + \dot{m}_{LW}h_4 \quad (37)$$

$$\dot{m}_R + \dot{m}_{LW} = \dot{m}_{LS} \quad (38)$$

$$\dot{m}_R\xi_R + \dot{m}_{LW}\xi_{LW} = \dot{m}_{LS}\xi_{LS} \quad (39)$$

$$\dot{m}_R h_7 + \dot{m}_{LW} h_4 + \dot{Q}_D = \dot{m}_{LS} h_3 + \dot{Q}_G \quad (40)$$

$$\dot{m}_{LS} h_1 + \dot{Q}_A = \dot{m}_R h_{12} + \dot{m}_{LW} h_6 \quad (41)$$

$$\dot{m}_R h_8 + \dot{Q}_C = \dot{m}_R h_7 \quad (42)$$

$$\dot{m}_R h_9 + \dot{m}_R h_{11} = \dot{m}_R h_9 + \dot{m}_R h_{12} \quad (43)$$

$$\dot{m}_R h_{11} = \dot{Q}_E + \dot{m}_R h_{10} \quad (44)$$

Para misturas binárias o estado é determinado quando 3 propriedades são conhecidas (Kuehn, et al., 1970). Recorrendo ao EES e fornecendo os valores de 3 propriedades para cada estado do ciclo da Figura 4 o sistema passa a ter 9 equações e 22 incógnitas. O sistema torna-se linear quando escrevemos as equações de balanço como sendo uma reta no diagrama entalpia-concentração, primeiramente considera-se uma parte da coluna e o gerador, e posteriormente parte da coluna e o deflegmador, esse arranjo determina a chamada linha de operação principal. Ao final um conjunto de equações foi encontrado, a Eq. (45) ilustra esse sistema.

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (h_1 - h_2) & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & h_3 & -h_7 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & \dot{m}_{LW} & -h_1 & h_{12} \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & (h_8 - h_7) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{m}_{LW} & (h_3 - h_2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \xi_{LS} & \xi_R \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{w}_P \\ \dot{Q}_D \\ \dot{Q}_A \\ \dot{Q}_C \\ h_{11} \\ q_E \\ h_5 \\ \dot{m}_{LS} \\ \dot{m}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{m}_{LW} - \dot{Q}_G \\ 0 \\ 0 \\ h_9 - h_8 + h_{12} \\ h_{10} \\ \dot{m}_{LW} h_4 \\ \dot{m}_{LW} \\ \xi_{LW} \dot{m}_{LW} \end{bmatrix} \quad (45)$$

Para estimar a quantidade de gelo a ser produzida foram necessários os valores do calor específico  $c_w$ , 4,187 kJ/kg°C e calor latente de fusão  $L_F$ , 335 kJ/kg, para a água, e o gelo por sua vez, apresenta um calor específico  $c_i$  de 2,110 kJ/kg°C (Althouse et al., 2004).

Primeiramente calcula-se o calor sensível envolvido na redução da temperatura ambiente (estimada em 28 °C) à 0°C através da Eq. (46).

$$Q_{\text{sensível}} = mc_w \Delta T \quad (46)$$

Em que  $m$  representa a massa de água a ser congelada e  $\Delta T$  a variação de temperatura. Em seguida, o calor de mudança de fase (latente) é calculado através da Eq. (47).

$$Q_{\text{latente}} = mL_F \quad (47)$$

Por último, o calor sensível envolvido na redução de temperatura de 0°C à -18 °C é dado também pela Eq. (46). A quantidade de energia  $Q_E$  a ser removida da massa de água é a soma desses três calores, isolando  $m$ :

$$m = \frac{Q_E}{490,216} \quad (48)$$

A energia  $Q_E$  pode ser encontrada a partir da taxa de resfriamento ou capacidade frigorífica  $\dot{Q}_E$ :

$$Q_E = \dot{Q}_E \Delta t \quad (49)$$

Em que  $\Delta t$  é o intervalo de tempo em horas. Uma das medidas mais tradicionais da região para comercialização de gelo é o “balde de manteiga”, Figura 5, que comporta aproximadamente 20 kg de gelo, através destes, isopores, sacas e demais recipientes são preenchidos com gelo.



Figura 5. Uma das unidades de gelo da região.

## 5. Resultados e discussão

A partir do desenvolvimento feito na seção anterior e a resolução da Eq. (45) todos os estados são definidos. As variáveis foram determinadas: o trabalho da bomba ( $\dot{w}_P$ ), o calor a ser removido do deflegmador ( $\dot{Q}_D$ ) e do absorvedor ( $\dot{Q}_A$ ), o calor rejeitado pelo condensador ( $\dot{Q}_C$ ), a entalpia na entrada do trocador de calor 1 ( $h_{11}$ ), o calor específico entrando no evaporador ( $q_E$ ), a entalpia da solução fraca que retorna para o absorvedor ( $h_5$ ), a vazão mássica de solução fraca ( $\dot{m}_{LS}$ ) e a vazão mássica de refrigerante ( $\dot{m}_R$ ). O termo  $\dot{Q}_E$  refere-se a taxa de calor a ser removida no evaporador (efeito de resfriamento desejado).

A Tabela 2 apresenta os estados com todas as propriedades estabelecidas, nos estados (1), (2) e (3) tem-se a mesma concentração e fluxo de massa onde há uma mistura forte em refrigerante, em (4), (5) e (6) o mesmo ocorre, porém tem-se a concentração de solução fraca em refrigerante, e de (7) a (12) temos os estados com pureza máxima de amônia na fase vapor, aproximadamente 1, que é um valor adequado tendo em vista a não separação total das duas substâncias, verifica-se nesses estados o menor fluxo mássico. Outro dado importante é a temperatura no estado (5), entrada do gerador, que foi de 115,55 °C e naquela pressão foi suficiente para efetuar a separação parcial dos vapores de amônia e água. A temperatura no estado

(10), entrada do evaporador, de  $-18,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  é adequada a produção de gelo, uma vez que água solidifica à pressão atmosférica a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tabela 2. Dados calculados.

Estado	x	P(kPa)	T( $^{\circ}\text{C}$ )	$\xi$	h(kJ/kg)	$\dot{m}$ (kg/s)
1	0	206,8	28,05	0,4117	-105,8	0,00697
2		1379	27,85	0,4117	-105,7	0,00697
3	0	1379	93,35	0,4117	187,8	0,00697
4	0	1379	115,55	0,3092	314,1	0,005932
5		1379	37,55	0,3092	-30,76	0,005932
6		206,8	37,85	0,3092	-30,76	0,005932
7	1	1379	54,45	0,9979	1352	0,001038
8	0	1379	35,75	0,9979	168,6	0,001038
9		1379	25,75	0,9979	119,8	0,001038
10	0,153	206,8	-18,05	0,9979	119,8	0,001038
11	0,995	206,8	-2,25	0,9979	1276	0,001038
12	1	206,8	14,95	0,9979	1325	0,001038

Na Tabela 3 a energia na forma de calor e trabalho é apresentada em termos de entradas e saídas, vale salientar que do ponto de vista da termodinâmica o trabalho (neste caso, eletricidade) é uma forma nobre, ou seja, necessita de uma conversão (por exemplo, conversão da radiação solar, da queima de diesel, do movimento de turbinas eólicas ou hidráulicas) enquanto o calor não, é uma forma primária, podendo ser obtido do escape de motores. Neste sentido a energia na forma de trabalho a ser fornecida a bomba teve um valor pequeno, o que representa um consumo de eletricidade ínfimo, e a maior demanda por energia ocorreu no gerador do SRA conforme prevê a literatura, o que mostra a vantagem desses ciclos frente os de compressão de vapor.

O calor no gerador (SRA) responde por 60% de 4,4 KW presente no escape do diesel gerador, conforme consulta da folha de dados do recuperador de calor da empresa Bowman® e do diesel gerador da empresa Caterpillar®. O COP máximo ideal teve um valor de 1,584 enquanto o real um valor bem abaixo, 0,538, devido o primeiro não levar em conta nos cálculos as irreversibilidades.

Tabela 3. Resultados das taxas de energia.

Componente	Entradas (kW)	Saídas (kW)
Absorvedor	-	2,28
Bomba	0,01	-
Gerador	2,64	-
Deflegmador	-	0,34
Condensador	-	1,45
Evaporador	1,41	-

A quantidade teórica em condições ideais de gelo a ser produzida, ou seja, assumindo que a água atinja a temperatura de  $-18,05\text{ }^{\circ}\text{C}$  (o que não ocorre na realidade) e que a temperatura ambiente na região seja de  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$  (embora essa seja a média, a sensação térmica é bem superior), pode ser encontrada a partir das Eq. (46), (47), (48) e (49). Nessas condições para uma operação de 24 horas do diesel gerador a quantidade de energia retirada da água tem um valor de 121824 kJ e a massa de água a ser transformada em gelo é de aproximadamente 250 kg, levando em conta a unidade de comercialização de gelo apresentada na Figura 5, seriam produzidas 12 unidades ao dia.

De acordo com os resultados apresentados a possibilidade de sistemas refrigeração por absorção acionados por escape de moto geradores na Amazônia foi verificada do ponto de vista da primeira lei da termodinâmica.

## 6. Conclusões

Neste trabalho um estudo de aproveitamento de escape de motor é apresentado com a finalidade de acionar um sistema de refrigeração por absorção para produção de gelo. Na região amazônica motores a diesel são comumente utilizados na propulsão de embarcações e no fornecimento de eletricidade para comunidades,

diante dessa realidade e no atual contexto de aumento de eficiência energética a proposta de sistemas de cogeração é animadora, além de contribuir para a produção de gelo para pescadores.

Foi elaborado um modelo termodinâmico com base na literatura estudada e práticas de engenharia que estima a quantidade de gelo a ser produzida a partir do aporte térmico de escape rejeitado por diesel geradores, adotando-se hipóteses operacionais que simplificam as equações dos dispositivos as propriedades desconhecidas são calculadas no EES e um sistema de equações linear é encontrado. Com a resolução deste sistema todas as taxas de transferência de calor são encontradas, principalmente aquela do evaporador, a partir da qual foi possível estimar a quantidade teórica de gelo que seria produzida.

Os resultados do modelo e simulação mostraram que é possível aproveitar escape de diesel geradores para produzir gelo através de sistemas de refrigeração por absorção baseado no par amônia-água, dessa forma uma quantidade significativa de eletricidade pode ser poupada para outra finalidade.

## Referências bibliográficas

Althouse, AD et al (2003) *Modern Refrigeration and air conditioning*. Illinois: Goodheart-Willcox.

Arora, CP (2013) *Refrigeration and air conditioning*. New Delhi: McGraw-Hill.

Bowman (2020) ‘*Exhaust gas heat exchangers, heat transfer technology from Bowman*’. <<https://ej-bowman.com/wp-content/uploads/2020/05/Exhaust-Gas-H.E.-Issue-M-English.pdf>> (accessed 2 february 2020).

Campos, RAT (2017) *Análise termodinâmica de um sistema de refrigeração por absorção para conforto térmico de ambientes*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho, Ilha Solteira.

Caterpillar (2020) ‘*Diesel generator sets: C1.1*’. <<https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20200616-37d83-98242.pdf>> (accessed 10 september 2021)

Çengel, YA, Boles, MA (2013) *Termodinâmica*. Porto Alegre: McGraw-Hill.

Cunha, KB et al (2018) *Acesso aos serviços de energia elétrica nas comunidades isoladas na Amazônia: mapeamento jurídico-institucional*. São Paulo: IEMA.

Ferreira, LAR (2018) *Dinâmica da atividade pesqueira e fatores espaciais da pesca no município de Alenquer: contribuições para o manejo*. Dissertação (Mestrado em Recursos Aquáticos Continentais Amazônicos), Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém.

Kuehn, TH et al. (1970) *Thermal Environmental Engineering*. 3 ed. New Jersey: Pearson.

Lima, EMM (2020) *A pesca do Acari (Pterygoplichthys pardalis) em sistemas de co-manejo na várzea do Baixo Amazonas, Pará, Brazil-Santarém*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Oeste do Pará, Santarém.

Marques, JES (2010) *Aplicação da lógica fuzzy no controle da cristalização de um sistema de refrigeração por absorção com par Água-Brometo de lítio*. Tese de doutorado, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.

Menna, MRM (2008) *Modelagem e Análise de custo de sistemas de refrigeração por absorção*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo.

Moran, MJ, Shapiro, HN (2012) *Princípios da Termodinâmica para Engenharia*. Rio de Janeiro: LTC.

Napoleão, DAS (2003) *Determinação da entropia de mistura amônia e água para aplicações em processos de refrigeração por absorção*. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

Nascimento, NR (2011) *Análise termodinâmica e otimização de um sistema de refrigeração por absorção para conservação de alimentos*. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (2019) *Plano anual da operação energética dos sistemas isolados para 2020*. Rio de Janeiro: ONS.

Operador Nacional do Sistema Elétrico (2022) ‘*Mapa dinâmico do SIN*’. <[www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas](http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas)> (accessed 10 january 2022).