

**MODELO SEQUENCIAL DO GRUPO GERADOR DE UM REFRIGERADOR SOLAR POR
ABSORÇÃO/DIFUSÃO A $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2$ PARA ARMAZENAMENTO DE VACINAS**

Gustavo Sana Trindade ^{(1),(2)} (gsannat@ufmg.br), Willian Moreira Duarte ^{(1),(2)} (willian@demec.ufmg.br),
Fabiano Drumond Chaves ^{(2),(3)} (fabianodc@cefetmg.br), Luiz Machado ^{(1),(2)} (luizm@ufmg.br)

⁽¹⁾ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); Departamento de Engenharia Mecânica

⁽²⁾ Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG); Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

⁽³⁾ Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG); Departamento de Computação e Mecânica

RESUMO: *O objetivo do presente trabalho é apresentar um modelo em regime permanente do gerador de vapor de um refrigerador por absorção/difusão a $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2\text{O}$ assistido por energia solar para armazenamento de vacinas em áreas desprovidas de energia elétrica. É imprescindível simular a operação do refrigerador para garantir que as vacinas sejam armazenadas nas temperaturas recomendadas pelos fabricantes, o que pode ser feito por meio de um modelo matemático do sistema, composto pelos modelos individuais de cada componente. O software Engineering Equation Solver (EES) foi selecionado para a tarefa, pois possui em sua biblioteca interna as funções de estado da mistura amônia-água. Foram utilizados recursos de programação sequencial para controlar e assegurar a convergência do sistema de equações não lineares. Portanto, foi necessário também implementar os métodos numéricos necessários para o cálculo dos parâmetros de interesse. O método de Newton-Raphson mostrou-se eficaz para esse propósito. A partir dos dados de entrada necessários, iguais aos dados de saída do componente anterior ao gerador, resultados de saída coerentes foram obtidos. A temperatura de saída e a concentração mássica de amônia do vapor gerado foram de 148,45 °C e 0,801, respectivamente. Já para solução pobre remanescente os valores encontrados foram 153,22°C e 0,251.*

PALAVRAS-CHAVE: REFRIGERAÇÃO, MODELAGEM, SUSTENTABILIDADE, VACINAS.

**SEQUENTIAL GENERATOR MODEL OF A $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2$ SOLAR ABSORPTION/DIFFUSION
REFRIGERATOR FOR VACCINE STORAGE**

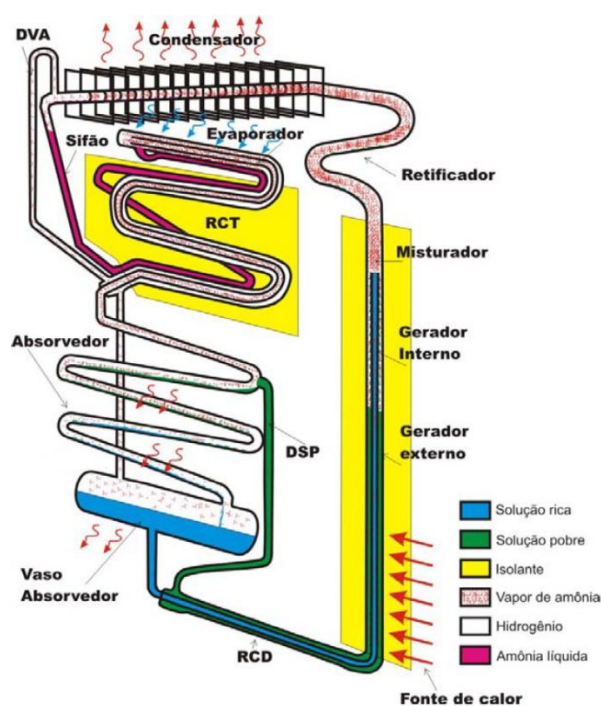
ABSTRACT: *The objective of the present work is to present a steady-state model of the steam generator of an $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2$ diffusion absorption refrigerator assisted by solar energy for vaccine storage in areas without electricity. It is essential to simulate the operation of the refrigerator to ensure that vaccines are stored at the temperatures recommended by manufacturers, which can be achieved through a mathematical model of the system, composed of individual models of each component. The Engineering Equation Solver (EES) software was selected for the task because it has the state functions of the ammonia-water mixture in its internal library. Sequential programming resources were used to control and ensure the convergence of the nonlinear equation system. Therefore, it was also necessary to implement the numerical methods required for calculating the parameters of interest. The Newton-Raphson method proved effective for this purpose. From the necessary input data, identical to the output data of the component preceding the generator, consistent output results were obtained. The output temperature and the mass concentration of ammonia in the generated vapor were 148.45 °C and 0.801, respectively. For the remaining weak solution, the values found were 153.22°C and 0.251.*

KEYWORDS: REFRIGERATION, MODELING, SUSTAINABILITY, VACCINE.

1. INTRODUÇÃO

Programas de vacinação sempre desempenharam um papel crucial na manutenção da saúde pública, o que foi novamente comprovado pela recente pandemia de Covid-19. Contudo, a falta de acesso à eletricidade continua sendo uma barreira significativa para a vacinação em áreas remotas (Uddin *et al.*, 2021). Conforme destacado por Alvala *et al.* (2019) e pela *International Energy Agency* (IEA, 2023^b), aproximadamente 500 mil famílias no Brasil enfrentam essa realidade. Globalmente, 760 milhões de pessoas ainda vivem sem acesso à energia elétrica (IEA, 2023^a). Assim, é vital desenvolver soluções de refrigeração para o transporte e armazenamento de vacinas nessas regiões, no intuito de expandir as campanhas de vacinação. Uma solução viável é o uso de refrigeradores movidos a energia solar, especialmente em áreas com alta incidência solar, como a região amazônica e outras do norte do Brasil e o continente africano. Um refrigerador por absorção/difusão, Figura 1, inventado e patenteado pelos suecos Von Platen e Munters, se apresenta como uma opção prática para essa aplicação. Esse tipo de refrigerador não possui componentes móveis, como um compressor, comum nos refrigeradores por compressão de vapor, e o fornecimento de calor pode ser independente de eletricidade para movimentar os fluidos no sistema. Os fluidos utilizados geralmente são a amônia (NH_3) como refrigerante, a água (H_2O) como absorvente e o hidrogênio (H_2) como gás inerte.

FIGURA 1. Refrigerador por absorção/difusão.



Fonte: Adaptado de Chaves *et al.* (2019).

Observa-se que calor entra no componente nomeado como gerador externo onde há solução pobre de amônia-água. Como ele encontra-se isolado do ambiente, parte desse calor é destinado à geração de vapor da solução pobre na região anular e parte é transmitido para o gerador interno onde há solução rica de amônia-água. No gerador interno uma parte da mistura também é vaporizada e a outra parte, líquida, retorna para o gerador externo. Posteriormente, ela entra em um recuperador de calor concêntrico em contracorrente, chamado de recuperador de calor duplo (RCD), enquanto os vapores sobem rumo ao misturador devido à força de empuxo. A mistura que não vaporiza no gerador interno e retorna ao gerador externo é empobrecida, visto que a amônia é mais volátil que a água e encontra-se em maior quantidade no vapor gerado. O grupo gerador é frequentemente chamado de bomba de bolhas, devido à geração de bolhas de vapor que ascendem.

Após a homogeneização no misturador, o vapor de amônia-água entra no retificador, onde, assim como em um sistema de refrigeração por absorção tradicional, há purificação do fluido refrigerante, isto é, condensação da água remanescente para que apenas vapor amônia entre no condensador por meio da transmissão de calor para o ambiente. Na sequência, vapor de amônia praticamente puro entra no condensador e amônia líquida é obtida também por meio da liberação de calor para o ambiente. Pode acontecer condensação parcial e a parcela de vapor de amônia remanescente escoar para o vaso absorvedor pelo direcionador de vapor de amônia (DVA).

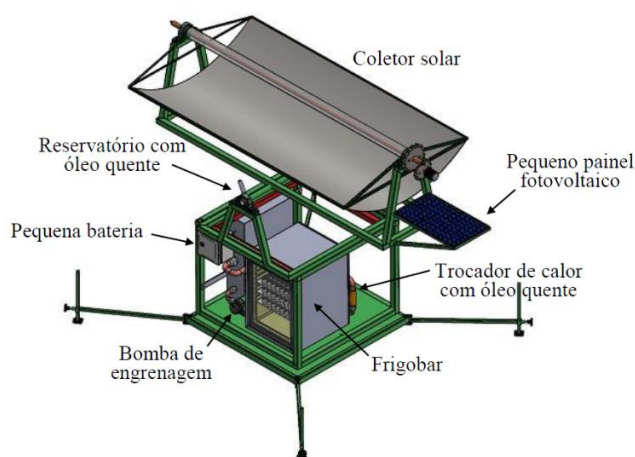
Amônia líquida segue por gravidade pelo sifão para o recuperador de calor triplo (RCT), onde libera calor para a amônia a baixa pressão que escoar na tubulação adjacente, antes de entrar no evaporador, o que beneficia a transmissão de calor do compartimento interno do refrigerador para a amônia, visto que ela entra a uma temperatura menor no evaporador depois de perder calor no RCT, que encontra-se isolado do ambiente externo. Logo, a produção de frio é potencializada. Ao entrar no evaporador, a pressão parcial da amônia cai significativamente devido à presença de hidrogênio, que é direcionado do vaso absorvedor para o absorvedor, posteriormente para região interna do RCT e por fim para tubulação do evaporador. A redução da pressão parcial da amônia promove redução da pressão de evaporação e, conseqüentemente, da temperatura de evaporação. Dessa forma, amônia absorve calor oriundo do compartimento interno do refrigerador, o que permite a geração de frio. Na região central do RCT, o vapor de amônia que evaporou acumula-se na tubulação que liga o RCT ao vaso absorvedor.

No absorvedor, a solução pobre de amônia-água advinda do RCD absorve o vapor de amônia que ascende do vaso absorvedor e enriquece-se continuamente à medida que desce para o vaso absorvedor. A solução enriquecida, portanto, acumula-se no vaso absorvedor e segue para parte interna do RCD, onde absorve calor proveniente da solução pobre que escoar na região anular que sai do gerador externo. Dessa forma, a solução rica é pré-aquecida antes de entrar no grupo gerador novamente e o ciclo reinicia-se. Durante o ciclo, a energia desejada é o calor que entra no

evaporador, visto que ele é transmitido do compartimento interno a ser refrigerado. Já a energia com custo ou energia paga é a energia fornecida ao gerador. Logo, O coeficiente de performance (COP) do refrigerador em questão é definido como a razão entre o calor que entra no evaporador e o calor que entra no gerador.

Para adaptar o funcionamento desse sistema à energia solar, pode-se substituir a resistência elétrica, que aquece a solução de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ no gerador, por um trocador de calor coaxial. Neste trocador, um óleo térmico aquecido em um coletor solar cilíndrico parabólico circula na região anular, conforme ilustrado na Figura 2, inicialmente apresentada por Mendes *et al.* (2021). Nela observa-se um reservatório de óleo, cuja circulação é promovida por uma bomba de engrenagens de baixo custo, alimentada por um pequeno painel fotovoltaico.

FIGURA 2. Refrigerador por absorção/difusão a óleo térmico.



Fonte: Mendes *et al.* (2021).

Neste contexto, alguns pesquisadores desenvolveram modelos matemáticos para investigar o comportamento termodinâmico desse tipo de refrigerador nos últimos anos. Em condições de regime permanente, destacam-se os trabalhos de Starace e Pascalis (2012), Taieb *et al.* (2016) e Chaves *et al.* (2019), que apresentaram resultados significativos como o coeficiente de performance (COP) e perfis de temperatura validados por testes experimentais. Modelos em regime transiente, especialmente do tipo caixa-preta, também foram desenvolvidos para estudar o comportamento dinâmico desse tipo de refrigerador. Destacam-se os trabalhos de Jemaa *et al.* (2016), que obtiveram uma função de transferência do sistema que calcula a eficiência em função da entrada de calor fornecida pela resistência elétrica e do tempo. Além disso, o estudo de Abuhabaya *et al.* (2023) mostrou que a evolução das temperaturas dos componentes, a resposta transitória, a temperatura interna e o COP são significativamente sensíveis à energia de entrada no gerador.

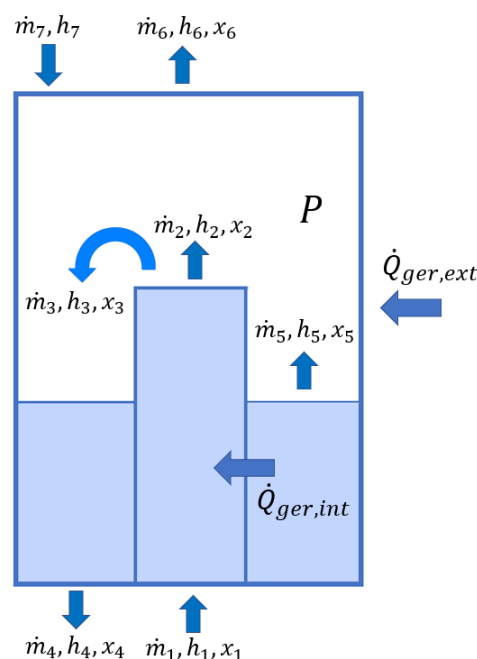
Em relação à adaptação solar, o trabalho mais recente encontrado foi publicado por Çetiner (2024), que avaliou experimentalmente o desempenho de dois pequenos refrigeradores de absorção por difusão $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$, um alimentado por eletricidade e outro pelo calor de um coletor solar parabólico, onde o óleo térmico flui para transferir calor ao gerador de vapor. A partir dos dados experimentais, foi possível determinar parâmetros operacionais como taxas de fluxo de massa, pressões e concentrações da solução de $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}$ usando um modelo matemático simplificado de estado estacionário apresentado.

Diante do exposto, o objetivo deste trabalho é apresentar um modelo sequencial detalhado e inédito em regime permanente dos geradores interno e externo de um refrigerador comercial de absorção por difusão $\text{NH}_3/\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ da Dometic, adaptado para armazenar vacinas em regiões desprovidas de eletricidade, com a intenção de contribuir para o desenvolvimento de metodologias de pesquisa recentes relacionadas ao tema.

2. METODOLOGIA

O modelo do gerador foi dividido em duas partes, uma para o gerador interno, onde entra a solução rica que sai do RCD, e outra para o gerador externo, onde escoa a solução pobre que entra na região anular do RCD. O diagrama do grupo gerador é ilustrado na Figura 3.

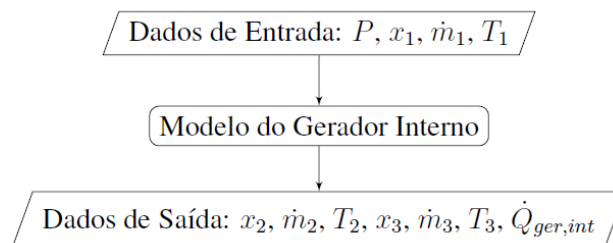
FIGURA 3. Diagrama ilustrativo do grupo gerador.



Fonte: Autor.

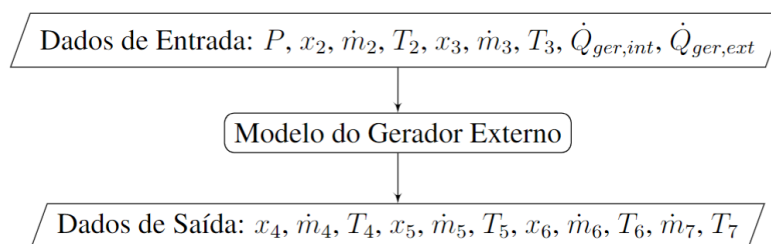
h , x , P , $\dot{m}$ representam a entalpia específica, a concentração mássica de amônia, a pressão e a vazão mássica, respectivamente. $\dot{Q}_{ger,ext}$ e $\dot{Q}_{ger,int}$ representam a taxa de calor que entra no gerador externo e interno, respectivamente. Os subscritos 2, 3, 4, 5, 6 e 7 representam os seguintes estados, respectivamente: saída de vapor de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ na região superior do gerador interno; saída da solução líquida de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ na região superior do gerador interno que verte para o gerador externo; saída da solução $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ na região inferior do gerador externo/entrada na região anular do RCD; saída de vapor de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ na interface líquido/vapor do gerador externo; saída de vapor de $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ na região superior do gerador externo rumo ao retificador; entrada de H_2O no gerador advinda do retificador. Fora as características geométricas e ópticas e as condições externas, a Figura 4 e Figura 5 ilustram os dados de entrada e saída dos geradores interno e externo, respectivamente. As entradas do gerador externo vêm do gerador interno que vêm do RCD.

FIGURA 4. Dados de entrada e saída do gerador interno.



Fonte: Autor.

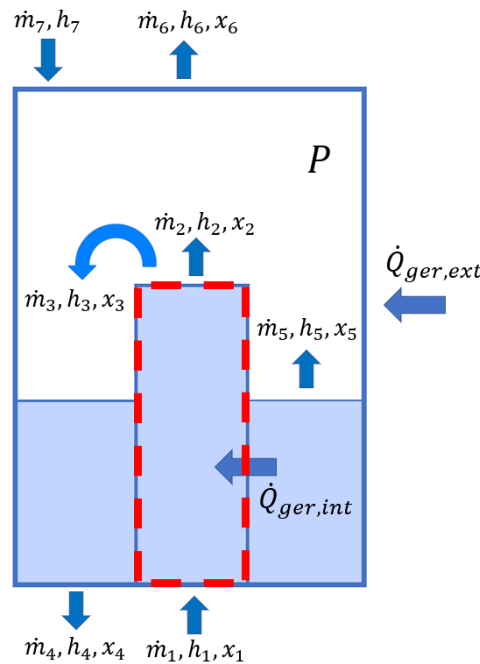
FIGURA 5. Dados de entrada e saída do gerador externo.



Fonte: Autor.

O balanço de massa da solução e de refrigerante do volume de controle delimitado pelas entradas e saídas do gerador interno, Figura 6, são dados pela Equação 1 e Equação 2, respectivamente. Além desses, o balanço de energia para o mesmo volume de controle é dado pela Equação 3. Ele é obtido a partir da primeira lei da termodinâmica em regime estacionário desconsiderando variações de energia cinética e potencial.

FIGURA 6. Volume de controle do gerador interno.



Fonte: Autor.

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3 \quad (1)$$

$$\dot{m}_1 x_1 = \dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_3 x_3 \quad (2)$$

$$0 = \dot{Q}_{ger,int} + \dot{m}_1 h_1 - (\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3) \quad (3)$$

A partir da entrada de calor no gerado interno, a solução é aquecida até que a geração de vapor se inicia. Como não há vaporização completa da solução, a parcela líquida, subscrito 3, verte para o gerador externo e a parcela como vapor, subscrito 2, ascende. Sendo assim, ambas parcelas se encontram na região de saturação e as propriedades devem ser avaliadas para título igual a zero para solução líquida e título igual a um para fase vapor. Ressalta-se que a mistura $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ não é azeotrópica, isto é, a mudança da fase líquida para fase vapor não ocorre a temperatura constante. De toda forma, T_2 é necessariamente igual a T_3 , visto que as fases coexistem imediatamente antes de se separarem na saída do gerador interno. O título (Q) pode ser calculado nesse ponto com duas propriedades independentes, T_2 e P , e a concentração imediatamente antes da separação das fases líquido e vapor, x_1 . Com ele, relaciona-se $\dot{m}_1$ e $\dot{m}_2$, e obtém-se a Equação 4.

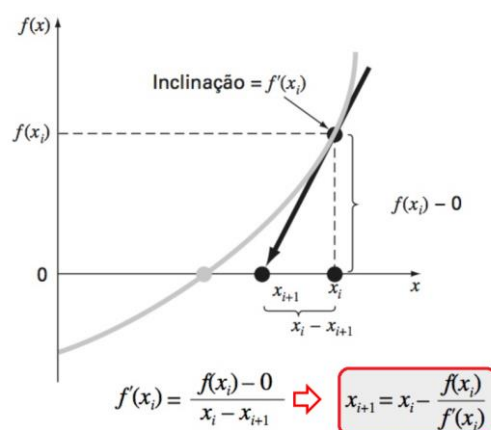
$$Q_2 = f(T_2, x_1, P) = \frac{\dot{m}_2}{\dot{m}_1} \quad (4)$$

As concentrações e entalpias também são funções de demais outras propriedades. Para cálculo da concentração, pressão, temperatura e título foram parâmetros de entrada utilizados nas equações de estado. Já para cálculo da entalpia, os parâmetros de entrada recorridos foram pressão, temperatura e concentração.

O EES é um software que opera de forma não sequencial em sua configuração padrão. Sendo assim, busca-se de forma iterativa a solução de um sistema de equações sem exigir qualquer programação numérica do operador. Entretanto, optou-se por programar e desenvolver o modelo do presente trabalho de forma sequencial para compreender e controlar a convergência, imprescindível para modelos mais complexos como os de sistemas de refrigeração por absorção/difusão. Nesses casos, observa-se que à medida que mais equações são introduzidas e a complexidade aumenta, o software não encontra as soluções desejadas. Tratam-se de sistemas altamente não lineares, cuja resolução concomitante é inviabilizada. Para desenvolver um método sequencial dentro do EES é possível definir funções, cujas raízes a serem encontradas com métodos numéricos, são as soluções das equações do sistema.

Para resolução do modelo do gerador interno, a primeira função definida foi para calcular T_2 como função das entradas P , x_1 , T_1 e $\dot{m}_1$. Há um valor de T_2 que satisfaz a Equação 1 e a Equação 2, já que x_2 é função de T_2 e x_3 de T_3 , igual a T_2 , pelo argumento apresentado anteriormente. O método de Newton-Raphson, Figura 7, mostrou-se eficiente para determinar o valor de T_2 e T_3 procurados. As derivadas necessárias para aplicação do método foram calculadas numericamente por diferença finita centrada e os valores iniciais foram estimados com base nos dados experimentais apresentados por Chaves *et al.* Ao determinar T_2 e T_3 , as entalpias h_2 e h_3 podem ser calculadas e, por fim, $\dot{Q}_{ger,int}$ também pelo balanço de energia da Equação 3.

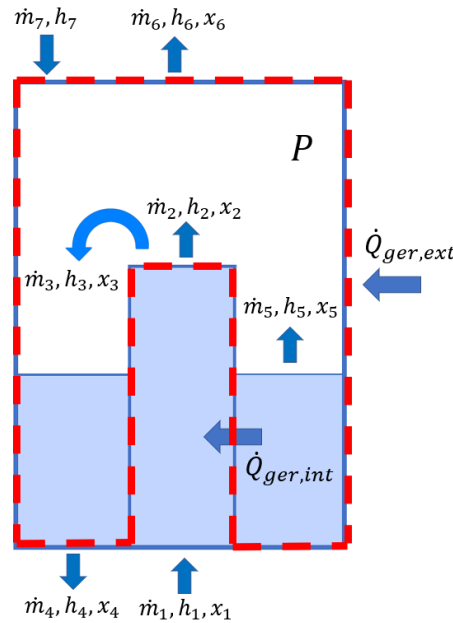
FIGURA 7. Método de Newton-Raphson.



Fonte: Adaptado de Chapra e Canale (2016).

Quanto ao gerador externo, os balanços de massa da solução e de refrigerante do volume de controle delimitado pelas entradas e saídas, Figura 8, são dados pela Equação 5 e Equação 6, respectivamente. O balanço de energia é representado pela Equação 7.

FIGURA 8. Volume de controle do gerador externo.



Fonte: Autor

$$\dot{m}_2 + \dot{m}_3 + \dot{m}_7 = \dot{m}_4 + \dot{m}_6 \quad (5)$$

$$\dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_3 x_3 = \dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_6 x_6 \quad (6)$$

$$0 = \dot{Q}_{ger,ext} - \dot{Q}_{ger,int} + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7 - (\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_6 h_6) \quad (7)$$

$\dot{m}_5$ não atravessa a fronteira do volume de controle delimitado, mas introduzi-la no equacionamento é imprescindível, pois constata-se que toda vazão de vapor que sai do gerador, $\dot{m}_6$, é a soma das vazões de vapor que vêm do gerador interno, $\dot{m}_2$, e externo, $\dot{m}_5$, Equação 8.

$$\dot{m}_6 = \dot{m}_5 + \dot{m}_2 \quad (8)$$

A partir da última constatação, também é possível estabelecer um balanço de massa de refrigerante, Equação 9.

$$\dot{m}_6 x_6 = \dot{m}_5 x_5 + \dot{m}_2 x_2 \quad (9)$$

Ademais, T_5 é necessariamente igual a T_4 devido ao mesmo argumento apresentado para o gerador interno. Para uma quantidade de energia que entra gerador externo, a solução se aquece até determinada temperatura em que as fases vapor e líquida coexistem. Daí, o vapor mistura-se com o vapor oriundo do gerador externo, Equação 8, e ascende rumo ao retificador enquanto a solução desce rumo ao RCD. Toda água presente no vapor da mistura $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ que sai do gerador externo, retorna para ele na fase líquida ao condensar no retificador, Equação 10.

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_6(1 - x_6) \quad (10)$$

Considerou-se que a água que condensa no retificador retorna para o gerador externo como líquido saturado. Por mais que haja sub-resfriamento, como trata-se de um líquido, incompressível, a entalpia não é alterada significativamente. Sendo assim, para calcular h_7 , portanto, é necessário computar T_7 . Como a água em questão escoar como uma fina película em contato com a parede, pela condição de continuidade de temperatura (Çengel e Cimbala, 2015), T_7 é igual à temperatura da parede nesse ponto, na interface entre o gerador e o retificador. Considerando um ponto infinitesimalmente acima do gerador externo, isto é, imediatamente na entrada do retificador, há perda de calor para o ambiente externo, visto que o retificador não é isolado como o gerador. Dessa forma, é possível estabelecer um balanço de energia entre a mistura $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$, a parede do retificador e o ambiente externo. Ao dividir o retificador em diversos volumes de controle e conhecendo a temperatura interna, a temperatura da parede do retificador, $T_{p,ret}$, pode ser determinada a partir da temperatura interna, $T_{int,ret}$, pela Equação 11.

$$(\alpha_{conv,amb} + \alpha_{rad})A_{ext}(T_{p,ret} - T_{amb}) = \alpha_{conv,int}A_{int}(T_{int,ret} - T_{p,ret}) \rightarrow \quad (11)$$

$$T_{p,ret} = f(T_{int,ret})$$

A_{ext} e A_{int} são as áreas superficiais externa e interna do volume de controle, cujo comprimento foi considerado igual ao diâmetro externo da tubulação ($D_{ext,ret}$). $\alpha_{conv,amb}$ e $\alpha_{conv,int}$ são os coeficientes de transmissão de calor por convecção externa e interna, respectivamente. α_{rad} representa o coeficiente de transferência de calor radiativo. No caso da interface gerador/retificador. A Equação 11 pode ser reescrita como a Equação 12.

$$(\alpha_{conv,amb} + \alpha_{rad})A_{ext}(T_{p,ret} - T_{amb}) = \alpha_{conv,int}A_{int}(T_6 - T_7) \rightarrow T_7 = f(T_6) \quad (12)$$

De acordo com Incropera *et al.* (2008) α_{rad} é dada pela Equação 13 e $\alpha_{conv,amb}$ pela correlação de Churchill e Chu, utilizada para convecção natural externa em cilindros, Equação 14.

$$\alpha_{rad} = \varepsilon \sigma (T_{p,ret}^2 + T_{amb}^2)(T_{p,ret} + T_{amb}) \quad (13)$$

$$\alpha_{conv,amb} = \frac{k_{ar}}{D_{ext,ret}} \left\{ 60 + \frac{0,387 Ra_{ar}^{\frac{1}{6}}}{\left[1 + \left(\frac{0,559}{Pr_{ar}} \right)^{\frac{9}{16}} \right]^{\frac{8}{27}}} \right\}^2 \quad (14)$$

T_{amb} representa a temperatura ambiente, σ a constante de Stephan-Boltzmann, ε a emissividade da superfície, k_{ar} a condutividade térmica do ar, Pr_{ar} o número de Prandtl do ar, função da temperatura, e Ra_{ar} o número de Rayleigh para o ar, dado pela Equação 15.

$$Ra_{ar} = \frac{g \beta_{ar} (T_{amb} - T_{p,ret}) D_{ext,ret}^3}{\nu_{ar} \gamma_{ar}} \quad (15)$$

g representa a aceleração da gravidade, β_{ar} o coeficiente de expansão térmica, dado pelo inverso da temperatura absoluta, ν_{ar} a viscosidade cinemática do e γ_{ar} a difusividade térmica do ar. Ressalta-se que todas as propriedades termofísicas do ar no uso da correlação de Churchill e Chu devem ser calculadas na pressão atmosférica e na temperatura do filme, equivalente à média aritmética entre $T_{p,ret}$ e $T_{int,ret}$.

Já $\alpha_{conv,int}$ pode ser calculado pela correlação de Nusselt de 1916, Equação 16, já que trata-se da condensação de água em tubo vertical com raio significativamente maior que sua espessura em regime laminar, típico de um refrigerador por absorção/difusão.

$$\alpha_{conv,int} = 0,943 \left[\frac{g \rho_l (\rho_l - \rho_v) k_l (h_v - h_l)}{\mu_l (T_{int,ret} - T_{p,ret}) L_{VC,ret}} \right]^{0,25} \quad (16)$$

ρ_l , μ_l , h_l e k_l representam, respectivamente: massa específica, viscosidade, entalpia e condutividade térmica do líquido saturado. ρ_v e h_v representam a massa específica e a entalpia do vapor saturado, respectivamente. $L_{VC,ret}$ representa o comprimento do volume de controle do retificador, considerado igual ao seu diâmetro externo.

O método de Newton-Raphson também mostrou-se eficiente para determinar o valor de $T_{p,ret}$ que satisfaz a Equação 12.

Para resolução do sistema de equações do modelo do gerador externo, a primeira função definida foi para calcular o valor de x_4 que satisfaz todos os balanços de massa tendo como entradas P , $\dot{m}_3$, x_3 , x_2 , $\dot{m}_3$ e x_6 . Ao estimar um valor para x_4 , é possível calcular T_4 . Como valor de T_5 é o mesmo, obtém-se x_5 . Com x_5 , a Equação 9 é combinada com a Equação 8 para se obter $\dot{m}_6$. Com $\dot{m}_6$, e x_6 , $\dot{m}_7$ é determinada pela Equação 10, útil para calcular $\dot{m}_4$ com a Equação 5. Por fim, a Equação 6 é utilizada para atestar a convergência de x_4 , isto é, compara-se o lado esquerdo da equação com o direito a partir dos cálculos realizados com o valor de x_4 estimado. Se eles forem diferentes, um método numérico deve ser utilizado para otimizar as novas estimativas e garantir a convergência de x_4 que satisfaz todos os balanços de massa.

A outra função definida para encontrar a solução do sistema do gerador externo foi para calcular h_6 . A ideia foi estimar um valor de h_6 para calcular x_6 . Com x_6 e os demais dados de entrada do modelo, P , $\dot{m}_3$, x_3 , x_2 e $\dot{m}_2$, calcula-se x_4 com a primeira função que certifica todos os balanços de massa. Daí, deve-se verificar o balanço de energia com o valor de h_6 estimado a partir da Equação 7. Ao programar um método numérico para encontrar h_6 a partir da primeira estimativa, todas equações são satisfeitas. Assim, tem-se a solução do sistema.

O método de Newton-Raphson e da secante não se mostraram eficientes na determinação de x_4 e h_6 com as funções definidas para resolução do modelo do gerador externo, como pode acontecer com métodos abertos a depender da natureza da função e das estimativas. Ao alterar as estimativas iniciais, os métodos abertos continuaram divergindo. Sendo assim, o método intervalar da bissecção precisou ser utilizado. Seu passo a passo é bem explicado por Chapra e Canale (2016). Porém, para que ele seja eficaz é necessário certificar que a raiz da função esteja cercada entre as estimativas iniciais inferior e superior. Em outras palavras, é necessário que o valor da função calculada no limite inferior tenha o sinal trocado em relação ao valor calculado no limite superior. As funções em questão, f para x_4 e g para h_6 , para convergência de x_4 e h_6 são dadas pela Equação 17 e Equação 18.

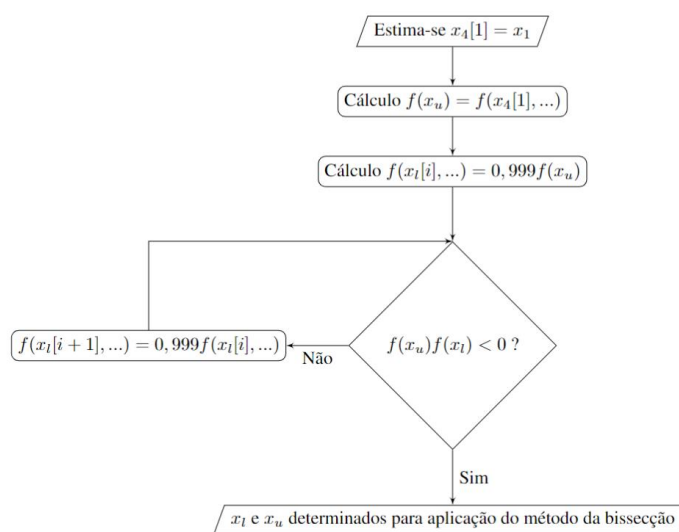
$$f(x_4, P, \dot{m}_3, x_3, x_2, \dot{m}_2, x_6) = \dot{m}_2 x_2 + \dot{m}_3 x_3 - (\dot{m}_4 x_4 + \dot{m}_6 x_6) \quad (17)$$

$$g(h_6, P, x_1, T_1, m_1) = \dot{Q}_{ger,ext} - \dot{Q}_{ger,int} + \dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_3 h_3 + \dot{m}_7 h_7 - (\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_6 h_6) \quad (18)$$

De forma abrangente, em que se almeja o modelo de todo refrigerador funcionando em regime permanente automaticamente, não é prático alterar os limites manualmente por tentativa e

erro para encontrar valores de x_4 e h_6 que tornam as funções definidas ora positiva, ora negativa. Sendo assim, foi desenvolvido um algoritmo para automatizar o processo. Inicialmente, é estimado um valor grande para x_4 e h_6 , tendo como base noções práticas e lógicas. Por exemplo, x_4 igual a x_1 . Obviamente, x_4 é menor que x_1 , visto que a concentração da solução pobre é necessariamente menor que a da solução rica. A função f com a primeira estimativa de x_4 é então calculada. O próximo passo consiste em reduzir o valor de x_4 sutilmente, em 0,1% por exemplo, e testar se o sinal da função calculada com esse novo valor foi invertido. Caso não seja, x_4 é reduzido de forma sutil novamente e assim por diante até que o sinal seja invertido. Dessa forma, possíveis limites são determinados e o valor da raiz da função que garante a convergência do sistema está entre eles. Por fim, o método da bissecção pode ser utilizado para determinar a solução para um determinado critério de parada suficientemente pequeno preestabelecido. A Figura 9 ilustra com um fluxograma o algoritmo construído para aplicação eficaz e automática do método da bissecção para função de cálculo de x_4 como exemplo.

FIGURA 9. Fluxograma do algoritmo para aplicação eficaz e automática do método intervalar da bissecção.



Fonte: Autor.

3. RESULTADOS

A Tabela 1 resume os dados de entrada utilizados para gerar os resultados apresentados na Tabela 2.

TABELA 1. Dados de entrada do modelo do grupo gerador.

Condições Externas	
T_{amb} (°C)	25,0
P_{atm} (bar)	0,91
g (m/s ²)	9,79
Geometria	
$D_{ext,ret}$ (mm)	13,90
$D_{int,ret}$ (mm)	9,90
$L_{vc,ret}$ (mm)	13,90
Avaliado Experimentalmente	
ε (-)	0,98
Parâmetros Estimados	
T_1 (°C)	116,62
$\dot{m}_1$ (kg/s)	$2,000 \cdot 10^{-4}$
x_1 (-)	0,35

Fonte: Autor.

TABELA 2. Dados de saída do modelo do grupo gerador

Estado	$\dot{m}$ (kg/s)	T (°C)	h (kJ/kg)	x (-)
2	$1,037 \cdot 10^{-5}$	136,11	1659,25	0,8829
3	$1,896 \cdot 10^{-4}$	136,11	408,48	0,321
4	$1,735 \cdot 10^{-4}$	153,22	512,64	0,251
5	$2,164 \cdot 10^{-5}$	153,22	1796,80	0,801
6	$3,200 \cdot 10^{-5}$	148,45	1754,34	0,830
7	$5,456 \cdot 10^{-6}$	148,41	625,31	0,000

Fonte: Autor.

As concentrações encontradas são coerentes, visto que x_3 é menor que x_1 e maior que x_4 . Além disso, x_2 e x_5 variam tipicamente entre 80% e 90%. As temperaturas determinadas também são pertinentes, pois comparam-se aos resultados experimentais apresentados nos artigos citados. A metodologia proposta também se mostrou eficiente para obtenção de resultados coerentes para diversas condições de entrada e diferentes parâmetros geométricos.

4. CONCLUSÕES

O principal objetivo do presente artigo foi apresentar o modelo em regime permanente do gerador de vapor de um refrigerador por absorção/difusão a $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O-H}_2\text{O}$ assistido por energia solar para armazenamento de vacinas em áreas desprovidas de energia elétrica. A partir de balanços de energia e massa, das correlações apropriadas de transmissão de calor e raciocínios compreensivos do funcionamento do refrigerador, sistemas de equações não lineares são obtidos para os modelos do gerador interno e externo, que foram escritos no software EES devido à presença das equações de estado da mistura amônia-água em sua biblioteca interna. Com o intuito do modelo em questão compor o modelo do refrigerador como um todo e para evitar possíveis falhas de convergência, optou-se por trabalhar com os recursos de programação sequencial do software e uma metodologia para resolução dos sistemas foi apresentada por meio da definição de funções, cujas raízes satisfazem os balanços de energia e massa. O método de Newton-Raphson mostrou-se eficiente para o modelo do gerador interno, mas não garantiu a convergência do modelo do gerador externo, mesmo alterando as estimativas iniciais. Sendo assim, o método intervalar da bissecção foi utilizado e um algoritmo para seleção automática e eficaz das estimativas inferior e superior foi apresentado. Por fim, conclui-se que o modelo e a metodologia de resolução propostos foram eficientes para determinação de resultados coerentes de vazão mássica, temperatura e concentração.

REFERÊNCIAS

- ABUHABAYA, A. et al. Experimental characterization of an ammonia–water–hydrogen diffusion absorption refrigeration system. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 52, 2023.
- ALVALA, R.C.S., DIAS, M.C.A., SAITO, S.M., STENNER, C., FRANCO, C., AMADEU, P., RIBEIRO, J., SANTANA, R.A.S.M. e NOBRE, C.A., 2019. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, Vol. 41.
- ÇETINER, C., 2024. “Thermal analysis of operating a solar-powered diffusion absorption refrigerator with a parabolic collector”. *Case Studies in Thermal Engineering*, Vol. 53.
- CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. Métodos Numéricos para Engenharia. Tradução: Helena Maria Ávila de Castro. 7a. Porto Alegre, RS: AMGH Editora Ltda, 2016.
- CHAVES, F. D.; MOREIRA, M. F. S.; KOURY, R. N. N.; MACHADO, L.; CORTEZ, M. F. B. Experimental study and modelling within validation of a diffusion absorption system. *International Journal of Refrigeration*, v. 101, p. 136-147, 2019.

IEA^a, 2023. For the first time in decades, the number of people without access to electricity is set to increase in 2022. *International Energy Agency*, Paris. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/energy-access>. Acesso em: 16 de julho de 2024.

IEA^b, 2023. Latin America Energy Outlook. *International Energy Agency*, Paris. Disponível em: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/76db9baf-1d00-40a1-939c-2c9f21127c11/BrazilenergyprofileEN.pdf>. Acesso em: 16 de julho de 2024.

INCROPERA, F. P. et al. Fundamentos de Transferência de Calor e Massa. Tradução: Fernando Luiz Pellegrini Pessoa, Eduardo Mach Queiroz e André Luiz Hemerly Costa. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

JEMAA, R. B.; MANSOURI, R.; BELLAGI, A. Dynamic testing and modeling of a diffusion absorption refrigeration system. *International Journal of Refrigeration*, v. 67, 2016.

MENDES, R.T.; MACHADO, L.; CORTEZ, M.F.B.; CHAVES, P.A.D.; CANÇADO, K.N.; CHAVES, D.F.; Modeling and Analysis of a Bubble Pump Parameters for a Solar-Powered Refrigerator by Diffusion and Absorption for Vaccine Storage in Regions Without Electrification. *Proceedings of the 26th International Congress of Mechanical Engineering*, Congresso Virtual, Brasil, 2021.

STARACE, G.; PASCALIS, L. D. An advanced analytical model of the Diffusion Absorption Refrigerator cycle. *International Journal of Refrigeration*, v. 35, 2012.

TAIEB, A.; MEJBRI, K.; BELLAGI, A. Theoretical analysis of a diffusion-absorption refrigerator. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 41, 2016.

UDDIN, M.A., MAHMUD, S., SALEHIN, S., BHUIYAN, M.A.A., RIAZ, F., MODI, A. and SALMAN, C.A., 2021. “Energy analysis of a solar driven vaccine refrigerator using environment-friendly refrigerants for off-grid locations”. *Energy Conversion and Management*, Vol. 11.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam sua gratidão pelo apoio recebido da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais), do CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e da CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior).

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.