

ESTUDO E ANÁLISE PARAMÉTRICA DA MODELAGEM DE UM REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO

Rafael da Silva Ribeiro Gonçalves, rafael.silva@ufpr.br¹

¹Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica; Núcleo de Desenvolvimento em Energia Autossustentável – NPDEAS, Laboratório de Células de Combustível – LaCelC
Cx P. 19011- 81351-990 – Curitiba, PR, Brasil.

Beatriz Jacob Furlan, beatrizfurlan@ufpr.br²

²Universidade Federal do Paraná, Departamento de Química; Núcleo de Desenvolvimento em Energia Autossustentável – NPDEAS, Laboratório de Células de Combustível – LaCelC
Cx P. 19011 – 81531-990 – Curitiba, PR, Brasil.

Lauber de Souza Martins, lauber@ufpr.br³

³Universidade Federal do Paraná, Departamento de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais – PIPE
Cx P. 19011- 81351-990 – Curitiba, PR, Brasil.

José Viriato Coelho Vargas, viriato@ufpr.br⁴

⁴Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica; Núcleo de Desenvolvimento em Energia Autossustentável – NPDEAS
Cx P. 19011- 81351-990 – Curitiba, PR, Brasil.

André Bellin Mariano, andrebmariano@ufpr.br⁵

⁵Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Elétrica; Núcleo de Desenvolvimento em Energia Autossustentável – NPDEAS
Cx P. 19011- 81351-990 – Curitiba, PR, Brasil.

Resumo. Em busca de conforto térmico e adequação de suas necessidades ao ambiente em que vivemos, a humanidade tem avançado em desenvolver sistemas mais eficientes de refrigeração e condicionamento de ar. Tais sistemas baseiam-se no uso de diferentes formas de energia para se alcançar o objetivo desejado. Energia elétrica é usada em sistemas de compressão a vapor e energia térmica é usada em sistemas de refrigeração por absorção. Os refrigeradores por absorção são considerados ecológicos e sustentáveis por funcionarem sem a utilização de fluidos refrigerantes que agredem a camada de ozônio e utilizarem energia térmica ao invés da elétrica para fazer o ciclo funcionar. Essa energia térmica pode ser obtida de gases aquecidos da saída de processos industriais, ou por meio de coletores solares, por exemplo. Este presente trabalho, embasa-se portanto, na análise de um refrigerador por absorção e na elaboração de um modelo matemático para viabilizar o funcionamento via simulação computacional usando o software Interactive Thermodynamics.

Palavras chave: Refrigeração por absorção; Modelagem Matemática; Análise Paramétrica; Coletor Solar; Transferência de Calor.

Abstract. In the search for thermal comfort and ways to adjust our needs to the environment that we live in, humanity has made advances in developing more efficient refrigeration and air conditioning systems. Such systems use different sources of energy to reach their designed goal. Electric energy is used in vapor compression refrigeration systems and thermal energy is used in absorption refrigeration systems. Absorption refrigerators are considered ecological and sustainable since they function without the use of refrigerant fluids that damage the ozone layer and use thermal energy to run the cycle. The thermal energy can be obtained from hot gases from industrial processes, or solar collectors, for example. The herein work is intended to study an absorption refrigeration system presenting a mathematical model that describes its performance using Interactive Thermodynamics computational tools.

Keywords: Absorption Refrigeration; Mathematical Model; Parametric Analysis; Solar Collector; Heat Transfer.

1. INTRODUÇÃO

Desde os primórdios a busca pelo conforto térmico é um fator determinante para a sobrevivência. Atualmente o conforto térmico é um fator para melhoria da qualidade de vida da sociedade (VASQUES, *et. al*, 2017). Um dos métodos mais utilizados atualmente é a refrigeração por compressão de gases onde a climatização de ambientes é feita através da compressão mecânica de um gás refrigerante e pela troca térmica com água. Esse processo apresenta problemas ambientais devido a possibilidade de vazamento de gases que causam a degradação da camada de ozônio. Embora largamente utilizados, tais sistemas de refrigeração são responsáveis por uma grande parte da conta elétrica, seja de uma residência, empresa ou indústria (MARTINEZ, 2018). Assim um dos métodos propostos como alternativa, é a substituição dos refrigeradores por compressão por um refrigerador por absorção, que consiste na utilização de energia térmica para gerar a refrigeração, assim reduzindo o consumo de energia elétrica apenas para o bombeamento de fluidos e instrumentos de controle de vazão e medição, caso sejam baseados em sistemas eletrônicos.

A energia térmica pode ser oriunda de gases aquecidos ejetados de ciclos industriais, fluidos aquecidos por coletores solares e pode-se ainda utilizar-se de energias renováveis para a produção de ar refrigerado, tornando-o um processo mais sustentável que o atualmente utilizado (MARTINHO, 2013). A grande vantagem da utilização do refrigerador por absorção é a não necessidade de gases refrigerantes, que são substituídos pelo gás amônia. Assim sendo um fator benéfico ao meio ambiente (GOSNEY, 1982). O refrigerador por absorção trabalha com uma mistura de fluidos de trabalho em ciclo fechado, onde um desses fluidos passa por uma mudança de fase e o outro serve como um absorvedor, sendo estes, amônia e água, respectivamente.

Uma vantagem da mistura de fluidos consiste no fato que ao obter a evaporação ou condensação dos fluidos de trabalho, devido a sua natureza de não ser uma substância pura, consegue-se uma temperatura de transição de fase não constante, assim ao se observar o funcionamento do ciclo em um gráfico T-S, obtém-se uma temperatura de evaporação e condensação maiores e menores, respectivamente, e com isso obtemos uma eficiência ligeiramente maior que ao se trabalhar com a amônia pura (HIGA *et al.*, 2018).

Há estudos da possibilidade de cogeração na produção de energia elétrica, utilizando-se um só fluido de trabalho com extração de energia térmica de gases quentes da indústria ou automóveis. Este ciclo consiste na utilização da mistura de amônia e água como fluido de trabalho, passando pelo ciclo Kalina para a produção de energia elétrica, e o refrigerador por absorção para a produção de fluidos em ambientes frios. Mas esse processo não se limita à obtenção de frio, podendo se primar pelo aquecimento em vez de resfriar (CHEN *et al.*, 2015).

Durante a operação a mudança de fase ocorre no condensador e evaporador, que trabalham com a amônia em estado puro. Como consequência deste processo obtemos um equipamento que absorve calor, ao passar pelo evaporador, assim retirando calor do fluido ambiente.

O presente trabalho, portanto, consiste na análise do sistema refrigerador feito por (Vargas, *et. al*, 1996) e os equacionamentos, especialmente considerado a sua adimensionalização, com um modelo matemático feito pelos autores, mostrando a viabilidade do refrigerador por simulações computacionais, e uma análise paramétrica para verificar quais as condições ótimas de trabalho, considerando o coletor solar e os trocadores de calor condensador e evaporador assim evidenciando a capacidade de produzir fluidos no ambiente refrigerados com um refrigerador por absorção com energia térmica gerada pela absorção num coletor solar.

2. ESTUDO COMPARATIVO DA MODELAGEM MATEMÁTICA

Partindo da literatura (VARGAS, *et. al*, 1996) de um refrigerador sem a utilização de trabalho mecânico, e com a absorção de energia vinda de um coletor solar é realizado o equacionamento do coletor solar, trocador de calor condensador e evaporador. O primeiro modelo considerou a amônia pura como fluido de trabalho do refrigerador por absorção, sendo diretamente aquecido devido ao coletor solar. Devido à gaseificação, a amônia é encaminhada pela tubulação ao condensador, onde é liquefeita, liberando energia ao fluido externo. Em seguida, passa pelo evaporador, retirando energia do espaço a ser refrigerado e por fim reiniciando o ciclo.

Um dos pontos a ser observado é a importância da temperatura superficial do coletor solar (T_{st}), que se for em algum momento igual a temperatura a ser transferida a amônia T_H , então não haverá calor líquido disponível para o refrigerador.

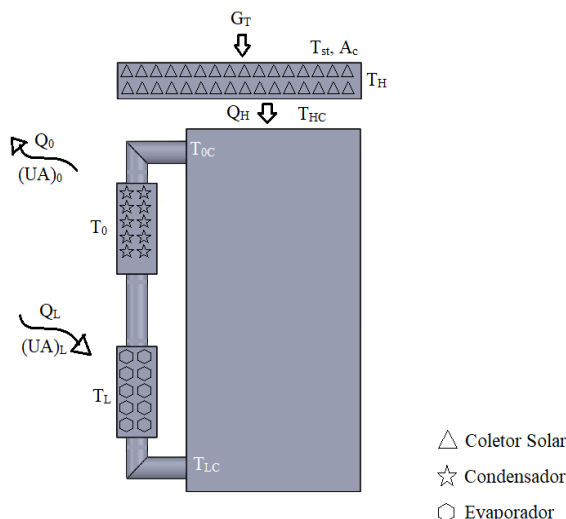


Figura 1. Refrigerador de absorção com amônia e indicações de trocas térmicas e temperaturas (O Autor, 2021)

Quando consideramos o coletor solar de placas planas, o refrigerador simplifica-se para um sistema, cujo trabalho mecânico é zero, pois o próprio ciclo não demanda a utilização de bombas, sendo utilizada a gravidade e a volatilidade da amônia para o funcionamento do ciclo. Também consideramos como hipóteses simplificadoras aquelas que não temos nenhum dos processos que é de fato responsável pela diminuição da exergia presente, que são: a mistura de fluidos de trabalho, a aceleração dos fluidos através da utilização de bombas, e a queda de pressão devido ao atrito molecular, para que estes não estejam mais presentes (MORAN; SHAPIRO, 2000).

Assim, conforme segue as Eqs. (1)-(8) - sendo estas, equações de transferência de calor para o coletor, condensador e evaporador - temos que:

$$Q_H = A_c G_T [\alpha - \beta (T_H - T_0)] \quad (1)$$

$$Q_H = (UA)_H (T_H - T_{HC}) \quad (2)$$

$$Q_0 = (UA)_0 (T_{0C} - T_0) \quad (3)$$

$$Q_L = (UA)_L (T_L - T_{LC}) \quad (4)$$

$$\frac{Q_H}{T_{HC}} + \frac{Q_L}{T_{LC}} = \frac{Q_0}{T_{0C}} \quad (5)$$

$$Q_H + Q_L = Q_0 \quad (6)$$

$$T_{st} = T_0 + \frac{\alpha}{\beta} \quad (7)$$

$$UA = (UA)_H + (UA)_0 + (UA)_L, \quad (\text{constante}) \quad (8)$$

Em que:

Q_H é a transferência de calor do coletor solar, W; A_c é a área do coletor solar, m^2 ; G_T é a irradiação solar, $Wm^{-2}K^{-1}$; α e β são constantes do processo; T_H é a temperatura do coletor solar, K; T_0 é a temperatura do trocador de calor condensador a temperatura ambiente, K; $(UA)_H$ é o produto do coeficiente de transferência de calor global com a área de transferência do coletor solar, WK^{-1} ; T_{HC} é a temperatura do fluido de trabalho no refrigerador por absorção, K; Q_0 é a transferência de calor do condensador, W; $(UA)_0$ é o produto do coeficiente de transferência de calor global com a área de transferência do condensador, WK^{-1} ; T_{0C} é a temperatura do fluido de trabalho no condensador, K; Q_L é a transferência de calor do evaporador, W; $(UA)_L$ é o produto do coeficiente de transferência de calor global com a área de transferência do evaporador, WK^{-1} ; T_L é a temperatura do trocador de calor evaporador, K; T_{LC} é a temperatura do fluido de trabalho evaporador, K; e T_{st} é a temperatura da superfície do coletor solar, K.

Definimos então os seguintes parâmetros adimensionais:

$$\tau_H = \frac{T_H}{T_0}, \tau_L = \frac{T_L}{T_0} \quad (9)$$

$$\tau_{HC} = \frac{T_{HC}}{T_0}, \tau_{0C} = \frac{T_{0C}}{T_0}, \tau_{LC} = \frac{T_{LC}}{T_0} \quad (10)$$

$$\tilde{Q}_H = \frac{Q_H}{UAT_0}, \tilde{Q}_0 = \frac{Q_0}{UAT_0}, \tilde{Q}_L = \frac{Q_L}{UAT_0} \quad (11)$$

$$\tau_{st} = \frac{T_{st}}{T_0}, B = \frac{\beta A_C G_T}{UA} \quad (12)$$

$$\gamma = \frac{(UA)_H}{UA}, \zeta = \frac{(UA)_L}{UA}, \frac{(UA)_0}{UA} = 1 - \gamma - \zeta \quad (13)$$

Em que:

τ_H é a temperatura do coletor solar adimensionalizada; τ_L é a temperatura do evaporador adimensionalizada; τ_{HC} é a temperatura do fluido de trabalho no refrigerador por absorção adimensionalizada; τ_{0C} é a temperatura do fluido de trabalho no condensador adimensionalizada; τ_{LC} é a temperatura do fluido de trabalho evaporador adimensionalizada; \tilde{Q}_H é a transferência de calor do coletor solar adimensionalizada; \tilde{Q}_0 é a transferência de calor do condensador adimensionalizada; \tilde{Q}_L é a transferência de calor do evaporador adimensionalizada; τ_{st} é a temperatura do coletor solar adimensionalizada; B é a adimensionalização do coletor solar; γ é a fração da área do coletor solar adimensionalizada em razão da área e troca total; ζ representa a fração da área do evaporador adimensionalizada em razão da área e troca total.

A Eq. (9) refere-se à temperatura efetivamente transferida (τ_H) ao refrigerador por absorção em função da temperatura ambiente, assim sendo adimensional. O mesmo para (τ_L), mas sendo este a temperatura no evaporador.

A Eq. (10) refere-se às temperaturas do fluido de trabalho em estado reversível, em razão da temperatura ambiente, obtendo-se então, um fator adimensional. As temperaturas seguem respectivamente: Temperatura da amônia no refrigerador (τ_{HC}); Temperatura antes do condensador (τ_{0C}); e temperatura após o evaporador (τ_{LC}).

A Eq. (11) refere-se à quantidade de calor que é transferida em razão do coeficiente de transferência de calor multiplicado a área pela temperatura ambiente, chegando-se também a uma unidade adimensional. Os índices tratam da quantidade transferida do coletor solar ao refrigerador (\tilde{Q}_H), do condensador (\tilde{Q}_0) e do evaporador (\tilde{Q}_L), respectivamente.

A Eq. (12) refere-se à temperatura da superfície do coletor solar em razão à temperatura ambiente; e a variável B indica o quanto de incidência solar multiplicado a área do coletor pela constante β ; em relação pelo produto do coeficiente de transferência de calor com uma área. Sendo assim também ambas adimensionais.

A Eq. (13) refere-se à adimensionalização da área de cada componente que tem troca de calor, sendo o produto do coeficiente de transferência de calor pela área do componente em razão do produto entre o coeficiente de transferência de calor pela área considerada padrão.

As variáveis a seguir indicam os componentes: adimensional da área do refrigerador (γ); adimensional do evaporador (ζ) e a do condensador equivale ao restante, sendo portanto, a soma deles equivalente a 100%.

Por meio de manipulações matemáticas, aplicando os parâmetros adimensionais das Eqs. (9)-(13) nas Eqs. (1)-(6) obtêm-se as seguintes equações (14)-(19), adimensionais, que descrevem o refrigerador:

$$\tilde{Q}_H = B (\tau_{st} - \tau_H) \quad (14)$$

$$\tilde{Q}_H = \gamma (\tau_H - \tau_{HC}) \quad (15)$$

$$\tilde{Q}_0 = (1 - \gamma - \zeta) (\tau_{0C} - 1) \quad (16)$$

$$\tilde{Q}_L = \zeta (\tau_L - \tau_{LC}) \quad (17)$$

$$\frac{Q_H}{\tau_{HC}} + \frac{Q_L}{\tau_{LC}} = \frac{Q_0}{\tau_{0C}} \quad (18)$$

$$\dot{Q}_H + \dot{Q}_L = \dot{Q}_0 \quad (19)$$

2.1. Modelagem Matemática e *Interactive Thermodynamics* - (IT)

O software *Interactive Thermodynamics* foi desenvolvido para servir de apoio aos estudantes a fim de promover a elaboração de modelos matemáticos para sistemas termodinâmicos, contando com tabelas termodinâmicas de vários materiais como de gases refrigerantes e de elementos gasosos até mesmo em seus estados padrões, como por exemplo, H₂, e CO₂. A facilidade de determinação de parâmetros a serem avaliados proporcionando análises paramétricas, é uma das grandes vantagens do software, que permite a observação da resposta do sistema à hipótese elaborada pelo operador.

O software possui interface amigável assemelhando seu funcionamento ao Sistema Operacional do Windows, permitindo que algumas de suas funções possam ser importadas ao Excel, e vice e versa. Também possui um sistema gráfico, aumentando a capacidade de análise do operador. O programa utiliza o método de Newton – Raphson como solucionador, assim cabe ao usuário ter uma ideia da estimativa inicial, para facilitar o processo de cálculo. Em decorrência do processo de cálculo o programa é informativo quanto a taxa de tolerância de cálculos, e em casos que essa taxa ultrapassa a tolerância, e se torna alta, o software de antemão oferece respostas com avisos de cuidado, proporcionando segurança na parte matemática das modelagens executadas através de si. Ele é acostumado a trabalhar com um número de 1000 iterações, mas pode ser ajustado para uma determinação maior, o que tomará um maior tempo para convergir as respostas.

Partindo do conjunto de equações adimensionalizadas vista acima pelas Eqs. (14)-(19), o código foi elaborado a fim de notar quais os pontos de temperatura possuem maior influência para a otimização do sistema com maior obtenção de fluido frio, destinado a climatização, frisando o mínimo de diferença térmica entre a estagnação do coletor solar e a temperatura efetivamente transferida ao gás amônia.

O fluxograma abaixo representa o processo de execução do código:

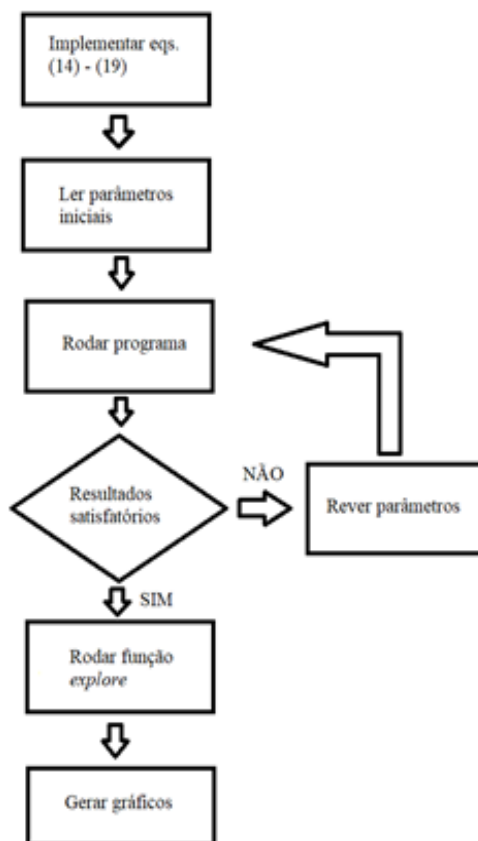


Figura 2. Fluxograma do processo de execução do código (O Autor, 2021)

2.2. Análise Paramétrica via *Interactive Thermodynamics* - (IT)

Visando obter uma maior quantidade de fluido ambiente frio com a menor temperatura de aquecimento do gás amônia, iniciamos uma análise paramétrica, se utilizando da função *explore* do software *Interactive Thermodynamics*. Iniciamos fazendo uma análise variando a temperatura da amônia em um fator de 1.34 a 1.5 vezes a temperatura ambiente. Essa alteração foi feita para diferentes parâmetros de B na eq. (12), que seriam coletores solares diferentes variando a área e incidência solar no coletor. Os resultados encontrados demonstram o valor de \dot{Q}_L , que consiste no quanto de transferência de calor o gás amônia recebe do fluido externo durante a sua evaporação, sendo representado na figura 3.

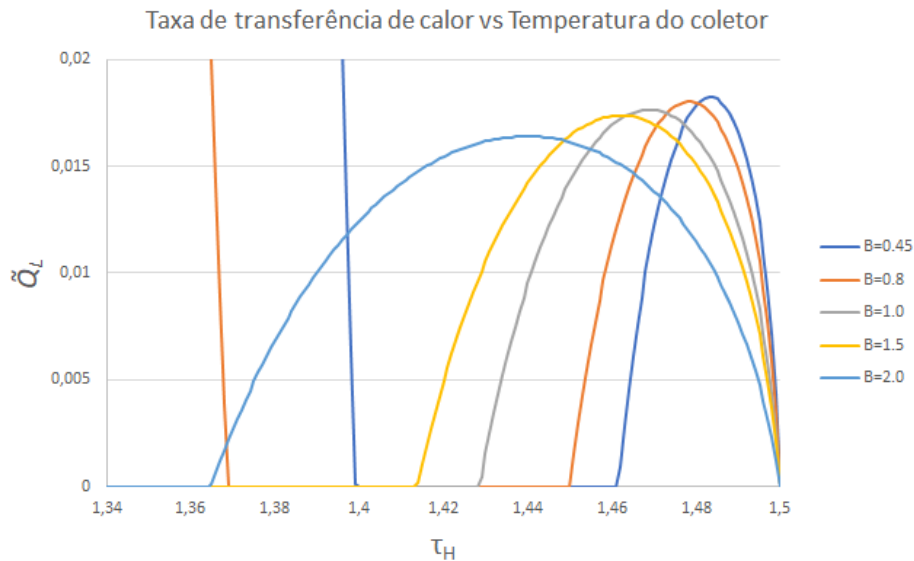


Figura 3. Taxa de transferência de calor útil em função da temperatura do coletor solar, (O Autor, 2020)

Quanto maior o valor de B maior a carga de refrigeração produzida, como exibido na Figura 3, assim quanto maior o coletor solar e a sua capacidade de captar a irradiação solar melhor a eficiência do refrigerador solar.

Para a determinação deste gráfico foi utilizado o software Excel, assim permitindo afirmar que a curva com valor e B=1.0 e a ideal pois o sistema já tende a uma estabilização próxima desse ponto, assim obtendo uma variação de temperatura necessária entre a superfície do coletor e o que é efetivamente transferido ao refrigerador, estabelecendo a curva escolhida, sendo representado na Figura 4.

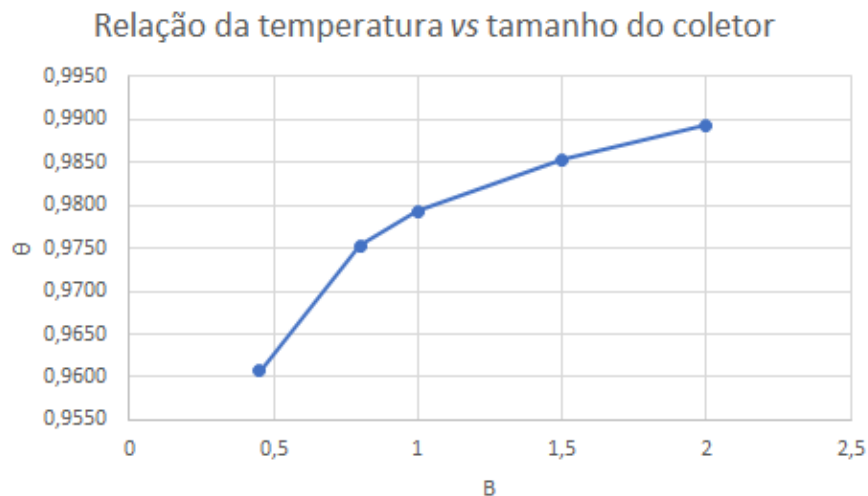


Figura 4. Relação da temperatura para o tamanho do coletor (O Autor, 2021)

Uma dificuldade obtida com o aumento de B é a proximidade do valor τ_H , com o valor de T_{st} , assim se faz necessário determinar uma eficiência combinada para determinar qual modelo pode ser mais interessante, considerando a influência do coletor solar no refrigerador por absorção. Como parâmetro de análise determinamos uma variável chamada teta que determina a razão entre τ_H e T_{st} e com isso avaliamos qual valor é o que oferece um valor menor para o valor de teta e com consequência temos uma maior eficiência na taxa de transferência e calor obtida, com menor taxa de complicação devido a temperatura de estagnação do coletor solar.

3. CONCLUSÃO

O presente trabalho visa a análise do funcionamento de um refrigerador por absorção utilizando energia térmica obtida através de um coletor solar. Ele consiste em uma dupla de trocadores de calor para efetuar mudança de estado do fluido de trabalho, que é composto por amônia pura. Amônia esta que é aquecida pelo coletor solar, que percorre até atingir a condensação no trocador de calor condensador, e evapora no trocador de calor evaporador, liberando energia térmica e a absorvendo, respectivamente.

Com isso, temos para o evaporador um resfriamento do fluido ambiente, conseguindo o objetivo do trabalho. Utilizamos uma simulação com o software *Interactive Thermodynamics*, para mostrar a viabilidade do sistema, e uma análise paramétrica para escolha do coletor, baseado na adimensionalização praticada no modelo.

Observamos através da Figura 3 a capacidade de obter fluido ambiente refrigerado com esta modelagem e na Figura 4, cujo coletor é indicado como a provável escolha, considerando a adimensionalização dada na Eq. (12). E, com este trabalho demonstramos que a refrigeração por absorção é um processo tecnológico cuja aplicação se mostra de maneira ecológica, devido a não utilização de gases que agredem a camada de ozônio, e também devido a utilização de fontes de energia menos nobres, assim diminuindo a emissão de CO_2 por ter um baixo efeito na produção, e consumo de energia elétrica.

4. AGRADECIMENTOS

A realização dessa pesquisa se deve graças ao suporte técnico do Laboratório de Máquinas Hidráulicas - LMH, ao Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Autossustentável - NPDEAS, ambos da UFPR. Além disso, agradecemos aos Programas de Pós Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais - (PIPE), e ao de Engenharia Mecânica - PGMEC. Ao Programa de Recursos Humanos da ANP - PRH 12.1, gestão FINEP, ao Projeto de Pesquisa 308460/2020-0. E por fim, agradecemos também, ao CNPq pelo financiamento das bolsas de Iniciação Científica.

5. REFERÊNCIAS

- CHEN, Yaping *et al.* Energy and exergy analysis of integrated system of ammonia–water Kalina–Rankine cycle. *Energy*, [S.L.], v. 90, p. 2028-2037, out. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.038>.
- GOSNEY, W.B., *Principles of Refrigeration*, London, Cambridge University Press, 1982
- HIGA, Márcio *et al.* Evaluation of the integration of an ammonia-water power cycle in an absorption refrigeration system of an industrial plant. *Energy Conversion And Management*, [S.L.], v. 178, p. 265-276, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2018.10.041>.
- MARTINEZ, Leonardo Cavalheiro. *MODELAGEM MATEMÁTICA quasi PERMANENTE E SIMULAÇÃO DE COMPONENTES DE REFRIGERADORES POR ABSORÇÃO*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2018.
- MARTINHO, Luciana Cristina dos Santos. *MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE REFRIGERADORES POR ABSORÇÃO*. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- MORAN M.; SHAPIRO H. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th ed., Wiley, 2000.

Rafael da Silva Ribeiro Gonçalves, Beatriz Jacob Furlan, Lauber de Souza Martins, José Viriato Coelho Vargas, André Bellin Mariano. ESTUDO E ANÁLISE PARAMÉTRICA DA MODELAGEM DE UM REFRIGERADOR POR ABSORÇÃO.

VARGAS, J.V.C.; SOKOLOV, M.; BEJAN, A; Thermodynamic optimization of solar-driven refrigerator. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 118, pp 130-135, 1996.

VASQUES, H.S.; BARROS, J. R.; SILVA, K. V; A importância do conforto térmico como indicador para transferência da capital do estado de Goiás. *Élisée, Rev. Geo. UEG – Porangatu*, v.6, n.1, p.125-136, jan./jun. 2017. Goiás, 2017.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.