

# Uma Análise da Refrigeração por Absorção Empregando uso de Energia Solar Térmica e Fluidos Verdes como Absorventes

Maria C. C Aguiar & Alex Vazzoler

A refrigeração solar por absorção é um campo de estudos de suma importância, em um contexto no qual ocorrem alterações climáticas alarmantes, devido ao seu potencial de redução de impactos ambientais em relação as fontes convencionais de energia. Um dos desafios de sua implementação é a substituição dos fluidos convencionais de refrigeração por fluidos mais ecológicos, como líquidos iônicos e nanofluidos. Vazamentos, além de consumo de eletricidade ou calor, geram impactos ao ambiente. Este artigo tem como objetivo explorar estas possibilidades discutindo as perspectivas atuais e futuras de fluidos não convencionais na refrigeração solar.

**Palavras-chave:** *refrigeração; engenharia solar; absorção.*

Solar absorption refrigeration is an extremely relevant study field, in an alarming climate changes' context, due to its potential to reduce environmental impacts compared to conventional energy sources. One challenge in its implementation is conventional refrigeration fluids' replacement by more ecological fluids, such as ionic liquids and nanofluids. Leaks, in addition to electricity and heat consumption, generate environment's serious effects. This articles explore current and future non conventional fluids' perpesctives in absorption refrigeration technology.

**Keywords:** *refrigeration; solar engineering; absorption.*

## Introdução

Em todo o mundo, há uma crescente preocupação com o desenvolvimento de sistemas de refrigeração mais eficientes e com menor impacto ambiental. De acordo com o estudo da International Energy Agency (IEA), uma diminuição nas emissões de CO<sub>2</sub> foi observada entre os anos de 2016 e 2018 devido ao investimento e à implementação de tecnologias de baixa emissão de gases estufa e mais energeticamente eficientes. Portanto, é necessário um maior esforço na busca por soluções energéticas com baixa geração de carbono e com potencial para aplicação em larga escala. O aumento na demanda por eletricidade, em particular, na área de refrigeração, sinaliza uma insuficiência de estudos neste setor<sup>1</sup>.

O ciclo de refrigeração é um sistema térmico cuja finalidade é a remoção de calor para a obtenção de uma temperatura desejada, abaixo da condição ambiente. A tecnologia escopo desta análise é a refrigeração por absorção, por permitir recuperação de calor residual<sup>2</sup>. Em função de serem os mais utilizados pela sua praticidade e pela boa funcionalidade em larga escala. Esses sistemas são constituídos por ventoinhas, trocadores de calor, compressores, evaporadores, bombas, tubulações e instrumentos de controle<sup>3</sup>. Sistemas térmicos solares, podem ser uma fonte oportuna de calor de média a baixa temperatura<sup>4</sup>.

Ferdinand Carré adquiriu a patente do primeiro sistema de refrigeração por absorção em 1860. A sua primeira aplicação ocorreu nos Estados Unidos durante a Guerra Civil americana pelos Estados Confederados para o suprimento de gelo natural<sup>5</sup>. Esta tecnologia tornou-se, ao longo dos últimos 160 anos, essencial e versátil para diversas aplicações. Desde a refrigeração predial (ar condicionado central) à utilização em processos de escala industrial.

Os sistemas de absorção operam com misturas de fluidos refrigerantes, usualmente binárias. Dentre as misturas comerciais destacam-se as misturas de água e brometo de lítio (H<sub>2</sub>O-LiBr) e de água-amônia (H<sub>2</sub>O-NH<sub>3</sub>)<sup>6</sup>. O fluido intitulado refrigerante absorverá calor de uma fonte a ser

refrigerada (fonte fria), enquanto o absorvente agirá como fluido térmico para dissipação de calor no ciclo<sup>7</sup>. Conforme as configurações do equipamento e suas condições de operação, será selecionado o fluido térmico que gere o melhor desempenho para esse sistema<sup>8</sup>.

A utilização do sistema de refrigeração contribui para conservação de produtos e conforto térmico de ambientes industriais. Dentre as tecnologias existentes, as de maior destaque são a refrigeração por compressão, por absorção, por adsorção, resfriamento evaporativo e refrigeração termoelétrica, sendo o último o menos usual<sup>9</sup>.

Para sistemas de refrigeração em escala industrial, pode ser fortuita a utilização de sistemas por absorção cujas fontes de energia sejam compostas por calor residual ou renovável<sup>10</sup>. Este trabalho procure apresentar as principais contribuições e a evolução tecnológica dos sistemas solares de refrigeração por absorção aplicados no contexto da indústria química, empregando-se fluidos verdes, como líquidos iônicos (LI) e nanofluidos<sup>11</sup>.

## TECNOLOGIAS EM REFRIGERAÇÃO SOLAR

Os ciclos de refrigeração têm diferentes aplicações e finalidades conforme a escala, a temperatura de refrigeração e os recursos energéticos disponíveis. Para aplicações que necessitem de menor escala, sejam estáticas e cuja a utilidade disponível seja eletricidade, a refrigeração por compressão é a mais recomendada. Aplicações domésticas, comerciais ou indústrias que não disponham de plantas de caldeiras, utilizam este tipo de sistema. Em contrapartida, plantas industriais com acesso a utilidades e sistemas de aquecimento podem recorrer aos sistemas de refrigeração por absorção e adsorção<sup>12</sup>.

A refrigeração por absorção usa uma fonte de calor para fornecer a energia necessária para conduzir o processo de resfriamento, cujo fluido térmico é composto pelo par refrigerante e absorvente. Em que o primeiro realiza o resfriamento evaporativo, e então é absorvido pelo segundo, são utilizadas duas colunas a absorvedora e a regeneradora para

purificação e posterior dissipação de calor no condensador. Já no ciclo por adsorção, o par consiste do refrigerante e de um sólido adsorvente que possui um funcionamento análogo. Apesar de poder ser energeticamente favorável conforme as condições de comparação<sup>13</sup>.

Os dois próximos subitens abordarão de forma mais pormenorizada esses dois sistemas.

## REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO E SEUS EFEITOS

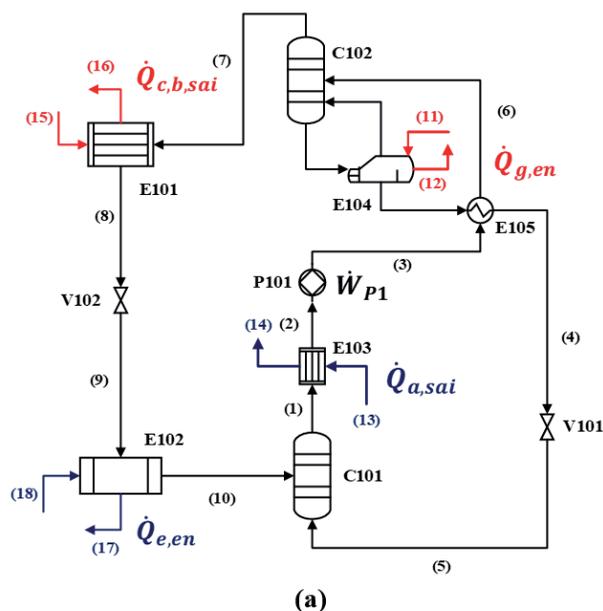
Ciclos de refrigeração operarão com ao menos um condensador, válvulas de expansão e evaporadores. O que os diferencia é a forma como o vapor de baixa pressão do evaporador será transformado em vapor de alta pressão e entregue ao condensador. O sistema de compressão de vapor usa um compressor para esta tarefa. Em contrapartida, o sistema de absorção primeiro absorve vapor de baixa pressão em um líquido adsorvente apropriado, o passo seguinte é elevar a pressão do líquido com uma bomba, e o passo final é liberar o vapor do líquido adsorvente por adição de calor na coluna absorvedora<sup>14</sup>. Por fim, a refrigeração por adsorção utilizada a propriedade de quimissorção do refrigerante em determinados sólidos, em substituição a absorção<sup>15</sup>.

Os componentes de um ciclo de refrigeração por absorção são apresentados na Figura 1. Dentre as formas de funcionamento desse sistema são utilizados os de efeitos simples (Fig. 1a), duplo (Fig. 1b) e triplo efeitos, sendo o último o menos utilizado<sup>16</sup>. Deve ser evidenciado o ponto de que baseiam-se no princípio da absorção de um refrigerante mais volátil por um adsorvente (de menor volatilidade), utilizando uma fonte de calor residual como vapor de baixa pressão, gases de exaustão, ou água quente para regenerar esta solução<sup>17</sup>.

Em um sistema de efeito simples, cujo fluxograma é apresentado na Figura 1a, o fluido refrigerante é aquecido no evaporador (E-102), este fluido é absorvido por uma solução concentrada (“forte”) em um sistema de contato por estágios (coluna C101), essa solução é diluída à

medida que o refrigerante é absorvido, transformando-se em uma solução “fraca”. Após a condensação (E-103) e pressurização (P101), esta solução (corrente 3) trocará calor com a corrente de fundo da coluna regeneradora (C104), ou regenerador, e após este aquecimento será alimentada a esta mesma coluna (corrente 22). Pela corrente de topo (corrente 23) será liberado o vapor de refrigerante (corrente 7), que será condensada pelo resfriador E101, e retornará ao processo após a expansão pela válvula V-102<sup>18</sup>.

De forma complementar, a Figura 1b apresenta o fluxograma de um sistema de refrigeração de duplo efeito. Este sistema possui duas colunas regeneradoras (C102 e C103) e uma coluna absorvedora (C101). A adição de uma coluna absorvedora (C103) e um estágio adicional de bombeamento (P102), permite ser atingida uma faixa de pressão mais alta do que o ciclo de efeito simples, como ilustrado pelo diagrama da Figura 2. O que permite a obtenção de maiores valores de eficiência de ciclo, expressos em termos do coeficiente de performance (COP), comparado ao ciclo de efeito simples.



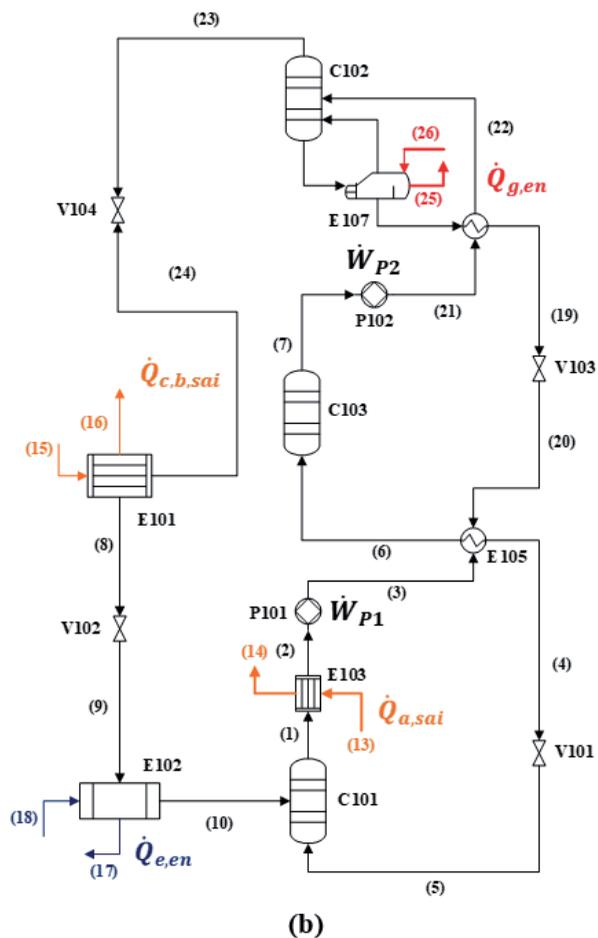


Figura 1: Fluxograma de processo representando ciclos de refrigeração por absorção de efeito simples (a) e de duplo efeito (b)

O cálculo do COP para ambos os ciclos é expresso pelas equações 1 e 2<sup>9</sup>.

$$COP_{sim} = \frac{\dot{Q}_{e,en}}{\dot{Q}_{g,en} + \dot{W}_P} \quad (1)$$

$$COP_{dup} = \frac{\dot{Q}_{e,en}}{\dot{Q}_{g,en} + \dot{W}_{P1} + \dot{W}_{P2}} \quad (2)$$

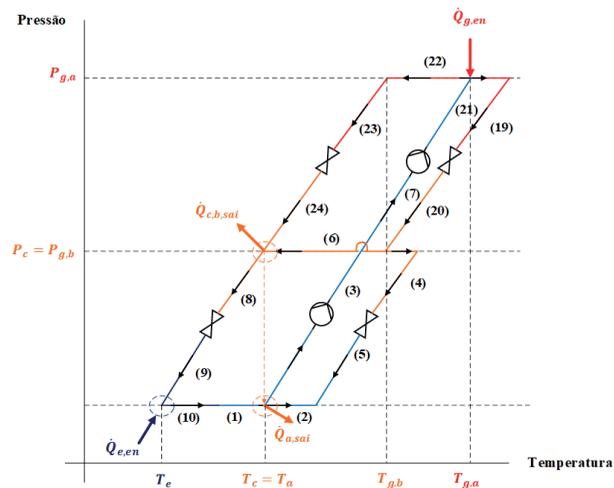
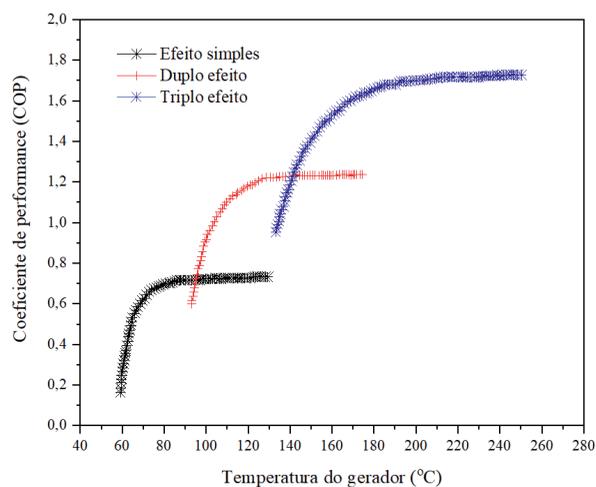


Figura 2: Diagrama de pressão e temperatura para um sistema de refrigeração por absorção de duplo efeito.

No cálculo do coeficiente de performance (*COP*) não são considerados os valores dos calores de condensação. Não obstante, os valores de potência (trabalho) de bombeamento são, muitas vezes, igualmente desprezados no cálculo do coeficiente expresso pelas equações 1 e 2. O fato de serem utilizados dois estágios de bombeamento aumenta a pressão no regenerador, cuja consequência é a elevação do coeficiente de performance (*COP*) do ciclo<sup>16</sup>. Por outro lado, é necessário utilizar uma utilidade de maior temperatura para permitir a separação entre refrigerante e solução fraca no regenerador, o que restringe o potencial uso de calor residual para estes sistemas<sup>16</sup>. Portanto, os sistemas de efeito simples e de duplo efeito são mais adequados ao escopo deste artigo que é a utilização de energia solar de temperaturas baixa e moderada em processos industriais<sup>19</sup>.

A Figura 3 apresenta curvas de temperatura dos regeneradores contra o coeficiente de performance para sistemas com diferentes números de efeitos para um ciclo de refrigeração por absorção cujo fluido de refrigeração é uma mistura de água com brometo de lítio (LiBr)<sup>17</sup>.



**Figura 3:** Curvas de temperatura do gerador contra coeficiente de performance para ciclos de refrigeração de simples, duplo e triplo efeito para um sistema de absorção utilizando a mistura refrigerante de LiBr-H<sub>2</sub>O<sup>18</sup>.

Esta figura apresenta a elevação da temperatura da utilidade com o número de efeitos utilizados. Apesar de o sistema de triplo efeito gerar os maiores valores de coeficiente de performance, da perspectiva da recuperação de calor residual ou de engenharia solar, não

é um sistema economicamente vantajoso na maioria dos estudos de caso<sup>20</sup>.

A Tabela 1 lista uma série de características de coletores e concentradores, verifica-se que resultados mais vantajosos são obtidos para sistemas de triplo efeito com temperaturas acima dos 180 °C. Nesta faixa de temperatura somente é viável utilizar concentradores, já que se encontra no limiar de capacidade dos coletores lineares do tipo Fresnel (somente atingirão temperaturas acima dos 200 °C em condições favoráveis)<sup>21</sup>. E outras formas de calor residual como gases de exaustão, possuem limites operacionais (como ponto de orvalho, no caso anterior) próximos a esta faixa de temperatura.

### REFRIGERAÇÃO POR ADSORÇÃO

O interesse por sistemas de refrigeração por adsorção foi impulsionado pela crise do petróleo na década de 1970, devido ao aumento expressivo do custo de energia, e posteriormente na década de 1990, devido aos problemas ecológicos relacionados ao uso de CFCs e HCFCs como fluidos refrigerantes em sistemas de compressão. Tais refrigerantes, quando liberados na atmosfera, tem o potencial para degradar a camada de

**Tabela 1:** Comparações entre os concentradores os diferentes tipos de concentradores e coletores.

Sistemas de concentração solar	Coletores			Concentradores	
	Coletor plano de caixa	Fresnel Linear	Cilíndrico Parabólico	Disco Parabólico	Torre solar
Fluido de trabalho	Água	Vapor	Óleo Sintético	Hidrogênio ou Hélio	Sais fundidos
Espaço ocupado	Pequeno	Médio	Grande	Pequeno	Médio
Consumo de água	Médio	Alto	Alto	Não consome	Alto
Armazenamento	Sim	Sim	Sim	Depende da configuração central	Depende da configuração central
Funcionamento híbrido (combinação com fotovoltaico)	Sim	Sim	Sim	Apenas em alguns casos	Sim
Aparato de absorção	Tubo	Tubo	Tubo	Ponto focal	Ponto focal
Razão de concentração	1	10-40	10-50	100-1000	100-1500
Faixa de temperatura (°C)	30-80	60-250	60-300	100-500	150-2000

ozônio, gerando impactos ambientais. Portanto sistemas com a capacidade de reutilizar o calor residual em níveis de baixa temperatura, como máquinas de adsorção e absorção, podem ser mais econômicas por consumirem calor residual e menos eletricidade<sup>22</sup>.

Em alternativa, em comparação aos sistemas de absorção, esses podem ser alimentados por uma grande variedade de fontes de calor, usualmente de 50°C a 600°C, apesar de temperaturas mais altas poderem ser utilizadas<sup>19</sup>. Adicionalmente, a refrigeração por adsorção não necessita de uma bomba ou coluna retificadora para o seu funcionamento, e é menos sensível a vibrações (compressão) e à posição de instalação (adsorção). Estas duas últimas características o tornam adequado para aplicações em locomotivas, ônibus, barcos e aeronaves<sup>15</sup>.

Embora os sistemas por adsorção ofereçam todos esses benefícios, apresentam como desvantagens baixo coeficiente de desempenho (COP) e baixa potência de refrigeração específica (*SCP, specific cooling power*). No entanto, esses sistemas podem ser aperfeiçoados intensificando-se a transferência de calor e massa no adsorvedor, com pares de substâncias que contenham fluidos com propriedades térmicas adequadas e sólidos microporosos com as respectivas propriedades para a quimissorção. Por um último, uma análise de sensibilidade deve ser aplicada para avaliar a faixa operacional funcional do ciclo<sup>23</sup>.

Um sistema típico de refrigeração solar por adsorção é ilustrado pela Figura 4. O Sistema é composto por um evaporador (E101), dois condensadores em série (E102 e E103), interligados por uma bomba (P101), sucedidos por vasos receptores (V101 e V102) que captarão as correntes de condensado, O condensador E102 opera a pressões mais baixas, enquanto E103 opera a maiores pressões, em função do bombeamento (P101). Este sistema é alimentado por um coletor solar cujo o interior é preenchido pelo adsorvente em contato com o fluido refrigerante<sup>22</sup>.

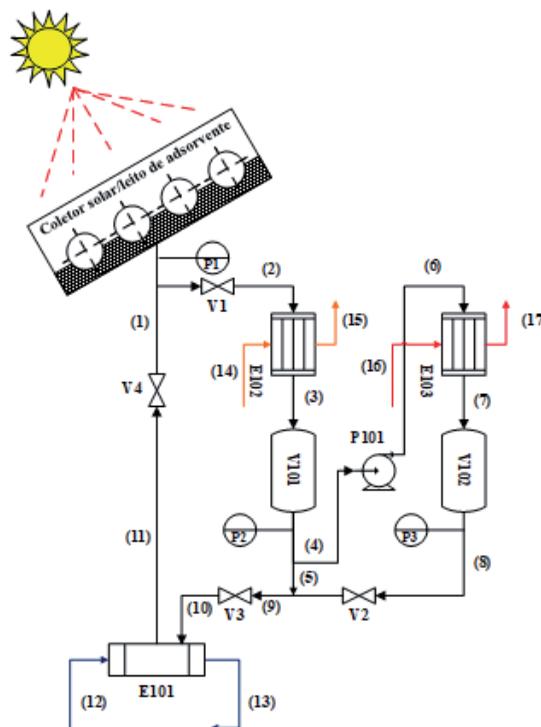


Figura 4: Refrigeração por adsorção.

Conforme o número de estágios de adsorção do ciclo, e características do refrigerante é esperado do adsorvente elevada capacidade de adsorção (alta área específica de superfície), aumento expressivo desta taxa com a temperatura e boa compatibilidade com refrigerante. Quanto ao refrigerante, os requisitos são: elevado calor latente de vaporização por unidade de volume; temperatura de ebulição e pressão de saturação adequadas; e ser inócuo com boas estabilidades química e térmica<sup>22</sup>. Alguns adsorventes comumente utilizados, e seus respectivos fluidos refrigerantes são: carbono ativado-metanol<sup>24</sup>, carbono ativado-amônia<sup>25</sup>, zeólita-água<sup>26</sup>, sílica-gel - água<sup>27</sup>, cloreto de cálcio-amônia e outros compostos adsorventes com amônia<sup>28</sup>.

Sistemas de refrigeração por adsorção são oportunos em aplicações de menor escala como refrigeração domiciliar e residencial. E quando combinados a

coletores solares, tornam-se um sistema sustentável de custo comparativamente baixo aos demais sistemas de refrigeração apresentados.

## FLUIDOS PARA REFRIGERAÇÃO SOLAR

### *Fluidos Convencionais*

Na indústria de processos químicos a refrigeração é aplicada em duas situações distintas de forma geral. No primeiro caso necessita-se refrigerar sistemas de pequena escala ou cuja temperatura de refrigeração esteja abaixo da escala de  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , neste caso é mais recomendável a utilização de sistemas de refrigeração por compressão, cujos fluidos de refrigeração são gases de ampla distribuição comercial como o R12, R22, R134a, amônia, dióxido de carbono em menor grau, dentre outros. Para refrigeração em maior escala e faixas de temperaturas mais elevadas,  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>29</sup> é pertinente a utilização de sistemas de absorção.

No ciclo de refrigeração por absorção comumente é utilizado como refrigerante uma solução cujos componentes possuam alta solubilidade mútua e cuja separação por destilação possa ser feita com relativa facilidade. O fluido refrigerante remove calor do meio desejado por meio da sua evaporação. Já, o fluido absorvente, retém o vapor do refrigerante em temperaturas mais baixas através de absorção, e por ser menos volátil, libera o vapor dessa substância por aquecimento<sup>7</sup>.

Os fluidos de refrigeração para absorção mais utilizados são a mistura de água com brometo de lítio ( $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ ) e de água com amônia ( $\text{H}_2\text{O} - \text{NH}_3$ ). Para a escolha do fluido mais adequado a ser aplicado em um ciclo por absorção, devem ser atendidos alguns requisitos como proposto por Sun, Fu e Zhang<sup>30</sup>:

- As substâncias que compõem o fluido, de preferência, devem ter baixo impacto ambiental e não serem tóxicas ou corrosivas;
- Ter baixa viscosidade, altos valores de calor específico, coeficiente de transferência de calor e entalpia de vaporização;

- Haver uma alta diferença de temperatura de ebulição entre o refrigerante e o absorvente, para facilitar a sua separação no conjunto regenerador e absorvedor.

Segundo Sun, Fu e Zhang<sup>30</sup>, entre outros trabalhos consultados<sup>16,31,32</sup>, foi verificado que o fluido de refrigeração mais utilizado em sistemas de refrigeração por absorção de baixa a média potência é a mistura de água com brometo de lítio ( $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ ), por melhor adequar-se aos requisitos operacionais e econômicos previamente descritos em comparação aos demais fluidos de refrigeração<sup>33</sup>. Os altos valores de entalpia de vaporização da água e a alta diferença de temperatura de ebulição entre a água e o brometo de lítio viabilizam a utilização desta combinação<sup>30</sup>. Entretanto, um problema associado à utilização do par  $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$  é a ocorrência de corrosão eletroquímica na torre absorvedora em decorrência da presença de brometo de lítio dissolvido em meio aquoso<sup>17</sup>.

As principais medidas para controle da corrosão gerada pela solução de brometo de lítio, são o controle da acidez (pH) e o uso de inibidores<sup>16</sup>. O primeiro é conduzido com a adição de pequenas quantidades de ácido bromídrico (HBr), com brometo de lítio presente em solução, sendo formada uma solução tampão, para que a composição do fluido de refrigeração não tenha suas propriedades alteradas significativamente. Alternativamente, os inibidores de corrosão promovem uma redução expressiva das taxas de corrosão, ao interagir com a superfície do metal formando uma camada de passivação. Dentre os inibidores comercialmente disponíveis, o Molibdato de Lítio ( $\text{Li}_2\text{MoO}_4$ ) é o mais utilizado em função de fatores econômicos e pela sua eficiência comparativamente alta<sup>18</sup>.

Em termos do funcionamento do sistema de refrigeração, a solução de brometo de lítio e água ( $\text{LiBr} - \text{H}_2\text{O}$ ) é um fluido cuja operação é relativamente simples comparado ao par amônia-água ( $\text{NH}_3 - \text{H}_2\text{O}$ ), devido às suas propriedades termodinâmicas, e apresenta rendimentos equiparáveis em condições próximas de operação, conforme os dados apresentados pela Tabela 2. No entanto, para ambos os casos, é necessário que o sistema

**Tabela 2:** Comparação da tecnologia de absorção<sup>35</sup>.

Sistema	Faixa de temperatura (oC)		Tipo de fluido	Capacidade de refrigeração (ton)*	COP
	Fonte de calor	Refrigeração			
Efeito simples	80-110	5 - 10	LiBr – H <sub>2</sub> O	10-100	0,5 - 0,7
Duplo efeito (em série)	120-150	< 0	NH <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O	3-25	0,5
	120-150	5 – 10	LiBr – H <sub>2</sub> O	Acima de 1000	0,8 - 1,2
Duplo efeito (em paralelo)	120-150	< 0	NH <sub>3</sub> – H <sub>2</sub> O		
Tripla efeito	200-230	5 -25 10	LiBr – H <sub>2</sub> O	Não informado	1,4 -1,5

\* 1 tonelada de refrigeração são 3,52 Kw.

seja hermético para evitar a entrada de ar no primeiro, ou possíveis vazamentos no segundo, minorando-se possíveis problemas operacionais e de segurança<sup>7</sup>. Para sistemas a alta pressão e de maior escala, o par amônia e água (NH<sub>3</sub> – H<sub>2</sub>O) tornar-se o mais competitivo<sup>7</sup>.

Conforme os dados da Tabela 2, pode ser verificado que o ciclo de efeito simples possui um coeficiente de performance (COP) relativamente baixo comparado a tecnologia de duplo efeito, com valores de COP na faixa de 1,0 a 1,4<sup>32</sup>. Em virtude da utilização de uma integração energética interna ao ciclo em que é utilizado o calor residual da corrente de saída do gerador para o pré-aquecimento da corrente de saída da absorvedora, conforme ilustrado pela Figura 2.1 (b)<sup>34</sup>.

O sistema de refrigeração por absorção de amônia por água (NH<sub>3</sub> - H<sub>2</sub>O) utiliza a amônia como refrigerante e a água como absorvente, em função das excepcionais propriedades térmicas da amônia. Adicionalmente, há forte afinidade entre estas duas substâncias e elevada solubilidade mútua em diversas condições de temperatura e pressão<sup>36</sup>. Esta solução é altamente estável e quimicamente compatível com diversos materiais, exceto o cobre e suas ligas, por sofrerem corrosão em contato com amônia. Apesar de a amônia ser considerada um refrigerante formidável, em razão de suas propriedades térmicas, é uma substância com elevada toxicidade e periculosidade<sup>37</sup>.

Essas unidades de forma usual utilizam calor residual, ou energia solar a temperaturas relativamente baixas. O par

fluido de refrigeração e absorvente, definem as faixas de temperatura para a evaporação e condensação, além das faixas de pressão a serem utilizados em todo o ciclo<sup>38</sup>. Na Tabela 3 é apresentada uma breve comparação entre os pares de fluidos NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>O-LiBr.

**Tabela 3:** Vantagens e desvantagens entre os tipos de fluidos<sup>37,38</sup>.

Tipo de Fluido	Vantagem	Desvantagem
NH <sub>3</sub> -H <sub>2</sub> O	Evaporativo nas temperaturas abaixo de 44 °C	Tóxico e perigoso para a saúde (amônia) Precisando de uma coluna de operação retificar em alta pressão
H <sub>2</sub> O-LiBr	Alto COP	risco de congelamento
	Baixas Pressões de operação Ambientalmente amigável e não corrosivo Alto calor latente de vaporização	Relativamente caro

### ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FLUIDOS CONVENCIONAIS PARA DIFERENTES SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Os maiores valores de COP atingidos pelos sistemas de múltiplos efeitos estão relacionados as maiores temperaturas e pressões atingidas por estes sistemas, obtidas apenas

com aquecimento fornecido por calor de média a alta temperatura<sup>34</sup>. Retomando-se as considerações do subtítulo anterior, foi apontado que o uso de um determinado par de fluidos no sistema modificará significativamente o valor da COP. A utilização do par LiBr-H<sub>2</sub>O permite a obtenção de um maior valor de COP em comparação ao par NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, para condições similares de escala e número de efeitos, operando-se em uma menor faixa de pressões de operação (apresentados na Tabela 2) e com maior calor latente de vaporização<sup>38,39</sup>.

Mazloumi et al.<sup>40</sup> com o objetivo de analisar um sistema de refrigeração solar por absorção de LiBr-H<sub>2</sub>O de efeito único em Ahwaz (Irã), acoplado a um coletor parabólico, obteve como resultado, um COP médio diário com variação entre 0,6 e 0,8. Enquanto para o mesmo tipo de sistema, Li et al.<sup>17</sup> obteve como resultado um COP entre 0,25 e 0,7 para a cidade de Yunnan (China). Esta diferença pode estar fortemente relacionada a incidência solar média consideravelmente maior no primeiro local. De forma complementar Ibrahim et al.<sup>41</sup>, determinou um valor de COP de 0,43 a 0,47 para um coletor a vácuo em Dhahran (Arábia Saudita)<sup>42</sup>.

Para a avaliação de sistemas de efeito simples com o par H<sub>2</sub>O - LiBr, Tierney<sup>39</sup> utilizou novas combinações entre resfriadores de água (*chillers*) e coletores para reduzir substancialmente a vazão de vapor d'água e obteve um COP de 1,4. Além de economizar 86% do consumo de energia em relação ao sistema de duplo efeito com coletor parabólico.

Buonomano *et al.*<sup>42</sup> para comprovar a viabilidade técnica e econômica do sistema e comparar com uma tecnologia convencional empregou um refrigerador solar de absorção de duplo efeito cujo o par refrigerante era o LiBr-H<sub>2</sub>O, empregando coletores solares (sem concentração solar). A configuração experimental foi instalada na Arábia Saudita, tendo como resultado eficiência de pico dos coletores superior a 60%, enquanto a eficiência média diária foi de cerca de 40%, obtendo-se um coeficiente de performance (*COP*) entre 1,1 e 1,3.

Hang *et al.*<sup>43</sup> realizaram uma avaliação econômica e ambiental detalhada de ciclo de vida de sistemas de duplo efeito, com LiBr-H<sub>2</sub>O como fluido de refrigeração,

comparando os sistemas solares com os sistemas convencionais, obtendo-se valores de COP de 0,91 a 1,02. Nos próximos dois itens serão apresentados fluidos de refrigeração “verdes”, comparados aos convencionais, o primeiro subitem abordará líquidos iônicos (LI) e o segundo nanofluidos.

## LÍQUIDOS IÔNICOS

Líquidos iônicos (LI) são definidos como sais cujo ponto de fusão é inferior ao ponto de ebulição da água a pressão atmosférica (cerca de 100 °C)<sup>44</sup>. São compostos formados por um cátion orgânico e um ânion, inorgânico ou orgânico, e podem ser utilizados em diversas aplicações na indústria química, como extração, reações de síntese, catálise e em processos eletroquímicos<sup>45</sup>. Particularmente, para a refrigeração, suas propriedades mais pertinentes são sua elevadíssima estabilidade térmica, baixo ponto de fusão, alto ponto de ebulição e elevada entalpia de vaporização<sup>46</sup>.

Comparados aos solventes orgânicos convencionais, o uso de líquidos iônicos tem inúmeras vantagens ambientais, em especial, a sua desprezível pressão de vapor e elevada estabilidade térmica. Tais propriedades facilitam a sua separação de outros fluidos, minimizam a possibilidade de vazamentos na forma de nuvens de vapor, tornando-os “fluidos verdes”<sup>30</sup>. LI's podem ainda ter suas propriedades físico-químicas alteradas através de mudanças na sua formulação, combinando-se diferentes cátions e ânions, a fim de atender os requisitos operacionais necessários<sup>47</sup>.

Os LI's podem ser um substituto para alguns dos fluidos de refrigeração em ciclos de absorção, como o par NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O, substituindo um ou outro componente do par conforme a aplicação<sup>48</sup>. Como muitos dos líquidos iônicos possuem pontos de fusão abaixo da menor temperatura da solução no sistema de absorção para o fluido LiBr-H<sub>2</sub>O (~300°C)<sup>38</sup>, podem eliminar os problemas de cristalização e corrosão gerados pelo par LiBr - H<sub>2</sub>O.

Os líquidos iônicos desempenham diversos papéis na produção de energia, por exemplo, na captura e conversão de energia solar em eletricidade, na conversão de biomassa bruta, ou recursos fósseis, em combustíveis mais limpos ou em tecnologias nucleares avançadas<sup>49</sup>. Com a finalidade de

ser estabelecida uma sistematização adequada dos tipos de LI's, estes são classificados em três categorias<sup>50</sup>: solúvel, parcialmente solúvel e insolúvel em água.

Os líquidos iônicos mais comumente utilizados possuem a estrutura radicalar 1-etil-3-metilimidazólio (EMIN). Sendo estes: 1-etil-3-metilimidazólio tetrafluoracetato (EMIM TFA); 1-etil-3- metilimidazólio trifluormetano sulfonato (EMIM OTF); 1-etil-3- metilimidazólio trifluormetano sulfonato (EMIM ETSO4) e 1-etil-3- metilimidazólio tetrafluor borato (EMIM BF4)<sup>49</sup>.

De acordo com o estudo de Kim et al.<sup>51</sup> a compatibilidade da água com [EMIM] [BF4] e as propriedades superiores dela como fluido de transferência de calor, como o elevado calor latente da evaporação, seguida pela menor vazão de refrigerante necessária, são vantagens comparativas pertinentes. LI's de maior viscosidade geram uma maior queda de pressão na circuito de refrigeração, requerendo-se maior potência de bombeamento ou tubulações de maior diâmetro<sup>52</sup>.

A possível aplicação de misturas de líquidos iônicos à temperatura ambiente (RTIL, Room Temperature Ionic Liquid) e água, como fluido, é desenvolvida a partir do

modelo de ciclo de absorção simples<sup>10</sup>. Verificou-se que um sistema H<sub>2</sub>O - RTIL, quando usado com um RTIL adequado, poderia competir com um sistema LiBr - H<sub>2</sub>O<sup>17</sup>. Também foram relatadas as relações de COP e fluxo das séries de H<sub>2</sub>O - LI e H<sub>2</sub>O -RTIL, de acordo com o gráfico de barras apresentado na Figura 5<sup>44</sup>.

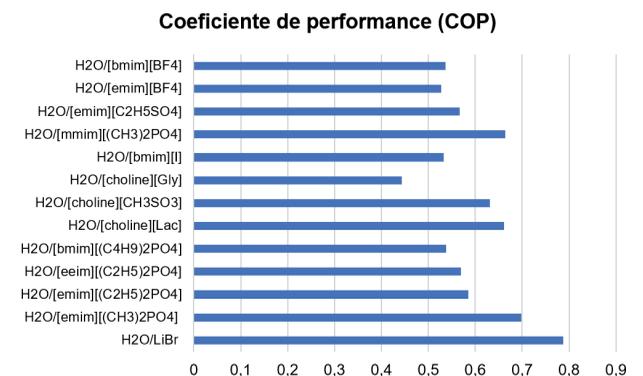


Figura 5: Gráfico feito para a comparação entre a funcionalidade de líquidos iônicos e LiBr - H<sub>2</sub>O.

Tabela 4: Exemplificações de nanofluidos<sup>54</sup>.

Nanofluido utilizado	Método de síntese	Vantagens	Referências
Óleo de transformador Mais suspensão de nanopartículas de Cu	Nanopartículas de cobre são misturadas ao óleo do transformador.	Coefficiente de transferência de calor aprimorado.	53
Suspensão de nanopartículas de Cu mais água	Uma suspensão é criada usando água e 5% de nanopartículas de Cu. O sal laurato é usado como estabilizante	Coefficiente de transferência de calor aprimorado.	53
Al2O3 e CuO em água	Nanopartículas de Al2O3 e CuO foram produzidas por condensação de gás. As nanopartículas foram misturadas com água e bem misturadas.	Coefficiente de transferência de calor aprimorado. Foram observados aumentos de 10% e 12% na condutividade térmica para Al2O3 e CuO, respectivamente.	54
Al2O3 em água e etilenoglicol	Nanopartículas de alumina foram dispersas em etilenoglicol.	Coefficiente de transferência de calor aprimorado. Foi observado um aumento de 18% na condutividade térmica para Al2O3.	58
Nanolubrificante de grafeno	O grafeno foi disperso no óleo do motor junto com alguns aditivos.	Desempenho tribológico aprimorado.	59

## NANOFLUIDOS

A nanotecnologia oferece diversas oportunidades para processar e produzir materiais com tamanhos médios de cristalitos abaixo de 50 nm. Líquidos com nanopartículas em suspensão são chamados de nanofluidos, termo proposto em 1995 por Choi do Argonne National Laboratory, EUA<sup>53</sup>. Logo, por definição, são suspensões coloidais originadas da projeção de partículas sólidas em algum fluido base, cujas propriedades são afetadas diretamente pelas propriedades físico-químicas do sólido em suspensão<sup>54</sup>. Em comparação aos fluidos convencionais mencionados, essa tecnologia permite fluidos com elevado condutividade térmica. Diferentes nanofluidos estão resumidos na Tabela 4, de acordo com os métodos de síntese e vantagens<sup>54,55</sup>.

Wang *et al.*<sup>56</sup> apontam os nanofluidos como a próxima geração de líquidos de transferência de calor, por oferecerem diversas oportunidades para elevar o desempenho dos fluidos térmicos em comparação aos convencionais. A adição de nanopartículas pode viabilizar a utilização de diversos fluidos, inclusive líquidos iônicos podem ser combinados a nanopartículas para melhoria de suas propriedades termofluidodinâmicas, apelidados de “*Ionanofluids*”<sup>57</sup>.

Na aplicação em relação a refrigeração, essas partículas, geralmente óxidos metálicos ou metais, aumentam os coeficientes de condução e convecção, tornando a transferência de calor mais eficiente. Em comparação com as suspensões convencionais de sólidos em líquidos para intensificação de transferência de calor, os nanofluidos possuem as seguintes vantagens<sup>58</sup>:

- Elevação da área específica de superfície, e portanto, maior área de contato entre partículas e fluidos;
- Alta estabilidade de dispersão;
- Redução da potência de bombeamento em relação ao líquido puro para alcançar a intensificação da transferência de calor equivalente;
- Propriedades ajustáveis, incluindo condutividade térmica e capacidade de veracidade da superfície, por diferentes concentrações de partículas para se adequarem a diferentes aplicações.

Para diferentes nanofluidos, algumas observações devem ser evidenciadas. Nanopartículas com geometrias mais alongadas proporcionam um aumento de condutividade térmica quando comparadas às suspensões esféricas<sup>59</sup>. Quanto menor o tamanho da nanopartícula, maior a área específica de superfície e maior o aumento de condutividade térmica<sup>56</sup>. Outro ponto, é que quanto menor for a condutividade térmica do fluido base, maior o incremento no valor global de condutividade térmica é gerado pela adição de nanopartículas<sup>59</sup>.

Os líquidos iônicos e nanofluidos tem uma grande importância dentro de um contexto maior envolvendo engenharia verde e recursos renováveis. Deve-se evidenciar a relevância de certos fatores ambientais como a toxicidade dos fluidos do sistema, os meios de descarte ou as emissões de gases envolvidas com os sistemas de refrigeração e aparatos auxiliares. Nos últimos trinta anos (ECO 92), alguns grupos de pesquisa<sup>60-62</sup> têm proposto novas abordagens envolvendo a introdução de fatores ambientais em seus cálculos com o objetivo de minimizar quaisquer impactos relacionados a estes sistemas<sup>63</sup>.

A discussão a seguir almeja avaliar alguns métodos utilizados em refrigeração para introduzir métricas que possam aferir, direta ou indiretamente, as eficiências energética, econômica e ambiental. Todavia, a discussão econômica não será abordada neste trabalho em função de seu escopo.

## Métricas Energético Ambientais em Refrigeração por Absorção

### MÉTRICAS DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E AMBIENTAL

O primeiro passo antes de uma avaliação ou estudo de impactos ambientais de sistema energético é garantir que este sistema foi adequadamente projetado. Para o caso particular de um sistema de refrigeração por absorção, os seguintes pontos devem ser levantados e avaliados<sup>37</sup>:

Os valores adequados de pressão e temperaturas

para o par absorvente e refrigerante devem escolhidos mediante análise de sensibilidade ou otimização. Todo o sistema de refrigeração tem uma faixa de pressão e temperatura adequada para seu funcionamento, desviar-se de tal faixa operacional implica em maiores custos com energia e consequente impacto ambiental. Dois índices muito importantes para esta análise são o coeficiente de performance (*COP*), sendo este o mais importante, e a potência específica de refrigeração (*SCP*, *Specific cooling power*) definido como a razão entre a carga térmica da corrente refrigerada e o valor de uma tonelada de refrigeração (3500 kW), conforme a equação 1<sup>9</sup>:

$$SCP = \frac{\dot{m}c_p(T - T_{sai})}{3510 \text{ kW}} \quad (3)$$

em que para a corrente a ser refrigerada é sua vazão mássica ( $\text{kg s}^{-1}$ ),  $c_p$  é o seu calor específico ( $\text{kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ),  $T$  e  $T_{out}$  são suas temperaturas de entrada e saída ( $^\circ\text{C}$ ).

Outro elemento passível de análise é a *pegada de carbono*. Uma forma rápida de comparar-se diferentes fluidos refrigerantes é multiplicar o seu *SCP* pelo fator de potencial de aquecimento global (*GWP*). Portanto, deve ser estimado o seguinte coeficiente<sup>64</sup>.

$$SCP_{GWP} = \frac{SCP_2 GWP_2}{SCP_1 GWP_1} \quad (4)$$

em que  $SCP_1$  e  $SCP_2$  São as potências específicas de refrigeração dos fluidos 1 e 2, e  $GWP_1$  e  $GWP_2$  são os fatores de potencial de aquecimento destes respectivos fluidos. Os valores tabelados de *GWP* de diferentes substâncias podem ser encontrados em diversos trabalhos da literatura, cuja fonte base são os relatórios da Agência de Proteção Ambiental (*EPA*, *Environmental Protection Agency*) dos EUA<sup>65</sup>.

Além do impacto direto do refrigerante, gerado por meio de vazamentos, qualquer sistema ou processo requer entrada ou remoção de energia. Logo, o impacto é medido de forma indireta pelas emissões de  $\text{CO}_2$  oriundas dos sistemas para a produção de energia ou eletricidade necessárias para operar o sistema de refrigeração, seja eletricidade

ou calor<sup>66</sup>. A fim de indicar o impacto ambiental global em um sistema de refrigeração durante sua operação, é utilizado um indicador ambiental, denominado impacto de aquecimento equivalente total (*TEWI*, *Total Equivalent Warming Impact*). A *TEWI* engloba o efeito direto do refrigerante “liberado” durante a vida útil do equipamento e o impacto indireto das emissões de  $\text{CO}_2$  de combustíveis fósseis ao longo deste mesmo período. O *TEWI* pode ser estimado por meio da equação 5<sup>67</sup>

$$TEWI = \text{Emissões diretas} + \text{Emissões indiretas} = (GWP)LN + E_a\beta n \quad (5)$$

em que,  $L$  é o vazamento anual, em kg (aproximado como 3% da carga de fluido refrigerante);  $N$  é o tempo de vida útil do sistema (cerca de 15 anos);  $n$  é o tempo de operação do sistema (baseia-se em dados de condições climáticas, assume-se como cerca de 4910 horas por ano);  $E_a$  consumo de energia anual em kWh por ano (deve ser estimado para cada fluido refrigerante) e  $\beta$  é o fator de emissão de dióxido de carbono em carbono equivalente ( $\text{CO}_{2\text{-eq}}$ ), cerca de 165 g  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  para a refrigeração por compressão, 102 g  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  para a refrigeração por absorção e 92 g  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  para a refrigeração por adsorção<sup>65,67</sup>

Outras métricas podem ser encontradas na literatura técnica e acadêmica, mas o *COP*, *SCP* e *TEWI* são as mais utilizadas por sua relativa simplicidade e pela disponibilidade de dados para comparação com resultados pré-existentes na literatura<sup>67</sup>.

No próximo item serão analisados os efeitos das variáveis de projeto e operação em sistemas de refrigeração por absorção, além de alguns cuidados operacionais.

## EFEITOS DE VARIÁVEL DE PROJETO, OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

A primeira variável de projeto em refrigeração, pelo fato de a temperatura de evaporação ser usualmente fixada pela necessidade da aplicação, é a temperatura do condensador ( $T_c$ ). A elevação da temperatura do evaporador poderá aumentar o valor de QR do ciclo. Por exemplo, para o sistema de refrigeração por absorção com o par de fluido água e amônia proposto por Sozen<sup>68</sup>,

verificou-se que para condensadores com temperaturas de 26,7; 35,0 e 40,0 °C, com as capacidades, em toneladas de refrigeração, de 31,5; 21,4 e 20,0. Foram obtidos os  $QR$  de 1,17; 1,27 e 1,41. Portanto variações de  $T_c$  de 8,3 e 13,3 °C implicaram em aumentos de  $QR$  de 8,5 e 20,5% respectivamente<sup>68</sup>.

Outro problema operacional de sistemas de refrigeração é a ocorrência de formação de incrustações e depósitos nas superfícies dos condensadores e evaporadores. A formação de incrustações e depósitos ocorre por mecanismos distintos, mas sua força motriz está relacionada a diferença entre a temperatura de parede da superfície de troca térmica e o seio do fluido. Alguns fluidos térmicos, como hidrocarbonetos, podem formar parafinas ou outros tipos de sólidos e devem ser tomadas medidas preventivas como uso de inibidores ou limpezas ocasionais de tubulações com *pigs*. Conforme os dados da Tabela 5, a medida que o evaporador e o condensador encontram-se sujos, para as mesmas temperaturas em ambos, a potência específica de refrigeração ( $SCP$ ) será aumentado devido a presença das resistências a transferência de calor introduzidas pelas incrustações que aumentarão a necessidade de vazão de gás refrigerante no circuito<sup>9,64</sup>.

Um elemento crucial em sistemas de refrigeração e muitas vezes menosprezado, é o isolamento térmico das tubulações. Pode ocorrer uma perda significativa de eficiência no sistema em função da “entrada de calor ambiente”. Especialmente em ambientes sujeitos a grandes variações de temperatura, como áreas expostas a insolação solar, chuva ou outras intempéries. A Tabela 6

apresenta os dados para isolamento térmico de um sistema de refrigeração com absorção considerando a temperatura ambiente em 35 °C, a emissividade do metal é 0,8 nas condições do ar com uma taxa de transferência de calor na margem de 10 a 15 kcal m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup><sup>70</sup>.

**Tabela 6:** Dados para isolamento térmico de um sistema de refrigeração.

Diferença de temperatura entre superfície e ambiente	Taxa de entrada de calor (kcal m <sup>-2</sup> h <sup>-1</sup> )	Área exposta por tonelada de refrigeração (m <sup>2</sup> kW <sup>-1</sup> )
5	35	86
10	73	41
15	113	27
20	154	19

Segundo Dossat<sup>37</sup> algumas regras práticas podem ser empregadas: linhas contendo água gelada (*chilled water*), ou a linha de sucção da bomba de refrigerante, devem ter espessura de 2 a 3 polegadas. Entretanto, as tubulações de refrigeração em geral necessitam apenas de cerca de 2 polegadas de espessura. Outro problema estrutural neste tipo de sistema é a ocorrência de corrosão sob isolamento (Corrosion Under Insulation, *CUI*)<sup>71</sup>.

Os fluidos envolvidos na refrigeração, tanto os refrigerantes quanto as correntes de processo, devem receber os respectivos tratamentos adequados. Na refrigeração de hidrocarbonetos, por exemplo, deve-se minimizar a formação de parafinas. Já no resfriamento de água, deve ser evitada a formação de depósitos

**Tabela 5:** Variáveis de funcionamento do sistema de refrigeração por absorção com o par água/amônia para diferentes condições de limpeza do evaporador e do condensador<sup>68-70</sup>.

Variável / condição	Normal	Condensador sujo	Evaporador sujo	Condensador e evaporador sujos
Temperatura do evaporador (oC)	7,2	7,2	1,7	1,7
Temperatura do condensador (oC)	40,5	46,1	40,5	46,1
Capacidade de refrigeração (toneladas)	17,0	15,6	13,8	12,7
Coefficiente de refrigeração, QR (kW/ton)	0,69	0,84	0,82	0,96
Aumento percentual de QR (%)	0	20,4	18,3	38,7

salinos. A maior resistência entre as correntes controlará a transferência de calor, e consequentemente, um fluido “sujo” será muito prejudicial a operação da refrigeração. Portanto, é necessária limpeza “*in situ*” ocasional do sistema para garantir alta efetividade dos trocadores. Além da remoção de bioincrustações em sistemas de água gelada e purga periódica de gases não condensáveis<sup>72</sup>.

Deve-se buscar melhoria de desempenho dos trocadores de calor do sistema, condensador e evaporador, utilizando-se chicanas ou trocadores de calor compactos quando possível. Outro cuidado, quando economicamente viável, utilizar moduladores de frequência nas bombas, e instrumentação preditiva (*feedforward*) para evitar a ocorrência de cavitação na mesma<sup>73</sup>.

## USO DE FLUIDOS DE REFRIGERAÇÃO NÃO CONVENCIONAIS DENTRO DO CONTEXTO DE MÉTRICAS AMBIENTAIS

Previamente neste artigo, os fluidos de refrigeração não convencionais foram apontados como uma possível alternativa, mais segura e ambientalmente benéfica, quando comparados aos fluidos convencionais como o par  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$  ou  $\text{LiBr-H}_2\text{O}$ . Tais fluidos foram desenvolvidos e estudados através da necessidade de obtenção de pares de refrigerantes renováveis, seguros e com menor impacto ambiental<sup>7</sup>.

As principais preocupações ambientais no uso de líquidos iônicos (LI) estão ligadas ao uso de solventes voláteis e matérias-primas não renováveis na sua síntese, cujo descarte adequado gera custos e possíveis problemas ambientais<sup>48</sup>. A seleção da composição adequada do LI pode reduzir tanto a emissão equivalente de  $\text{CO}_2$  quanto a toxicidade ou impactos de biodegradabilidade quando comparados aos fluidos de refrigeração convencionais<sup>50</sup>.

Para os nanofluidos, podem ser utilizados fluidos base de baixo impacto ambiental, com os próprios líquidos iônicos. Entretanto, os nanofluidos estão associados, em grande parte dos casos, à transferência de calor aprimorada (*enhanced heat transfer*) em comparação às propriedades termofísicas do fluido base, aumentando-se

por exemplo, sua condutividade térmica através da adição de nanopartículas. Esta adição acarreta uma maior toxicidade em relação ao fluido base. Logo, as rotas de síntese e as respectivas partículas geram maior impacto ambiental e possível toxicidade<sup>59</sup>.

Embora haja possíveis problemas ambientais envolvendo os fluidos não convencionais, estes têm menor gravidade se comparados aos fluidos comerciais, que apesar de possuírem menor custo são mais tóxicos, como o par  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , além de problemas com eventuais vazamentos<sup>20</sup>. Então, desenvolvendo-se novas rotas reacionais “verdes”, e com a intensificação da pesquisa nos últimos 20 anos<sup>51,52</sup>, podem ser propostos sistemas mais economicamente atrativos e com potencial de empregabilidade no mercado a médio prazo.

## Conclusões

A tecnologia de refrigeração por adsorção é mais conveniente para aplicações em menor escala, sem a presença de colunas absorvedoras ou retificadoras, sendo menos sensível a vibrações ou à posição da instalação. Por outro lado, a refrigeração por absorção, é utilizada em sistemas de maior escala, sendo perceptível a sua sensibilidade à posição da instalação, dentre outros fatores operacionais, em especial manutenção.

Sistemas com refrigeração por compressão, além de consumirem energia elétrica para o acionamento do compressor, utilizam fluidos convencionais de refrigeração com maior potencial para agravamento de alterações climáticas, como os antigos Clorofluorcarbonos (CFCs), os hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), os Hidrofluorcarbonos (HFCs), dentre outros. Estes gases possuem alto impacto ambiental e são passíveis de vazamento irreversível para a atmosfera. Apesar de que em comparação aos sistemas de absorção e adsorção, possuem maior valor de coeficiente de performance (COP)<sup>69</sup>.

Os fluidos de refrigeração não convencionais, líquidos iônicos e nanofluidos, apesar de serem menos

eficientes em comparação aos convencionais citados, possuem menor impacto ambiental e podem alcançar uma maior competitividade através de mais pesquisa e desenvolvimento.

## NOMENCLATURA

Alfabeto latino/grego	Variáveis	Unidades
$\beta$	Fator de emissão de dióxido de carbono em carbono equivalente	g CO <sub>2</sub> /kWh
Ea	Consumo de energia anual	kWh.h <sup>-1</sup>
L	Vazamento anual de refrigerante	kg
n	Tempo de operação do sistema	h
N	Tempo de vida útil do sistema de refrigeração	h
P	Pressão absoluta	kPa
Q	Carga térmica	kW
QGWP	Quociente entre fatores de aquecimento global	
QR	Quociente de refrigeração ou capacidade específica de refrigeração	
W	Potência de bombeamento	kW
T	Temperatura absoluta	K
TEWI	Total equivalent warming impact	kg

Subscrito	Descrição
a	Pressão absoluta
b	Baixa pressão
c	Condensador
e	Evaporador
en	Entrada
g	Gerador ou regenerador
p	bomba
sai	saída

Siglas	Descrição
<i>COP</i>	Coefficiente de Performance
<i>CUI</i>	Corrosion Under Insulation
<i>EPA</i>	Environmental Protection Agency
<i>GWP</i>	Global Warming Factor
<i>LI</i>	Líquidos Iônicos
<i>RTIL</i>	Room Temperature Ionic Liquid
<i>SCP</i>	Specific Cooling Power
<i>TEWI</i>	Total Equivalent Warming Impact

## Referências

1. IEA. *IEA, Global Improvements in Primary Energy Intensity, 2000-2018*; **2018**.
2. Arabkoohsar, A.; Sadi, M. Technical Comparison of Different Solar-Powered Absorption Chiller Designs for Co-Supply of Heat and Cold Networks. *Energy Convers Manag* 2020, *206*, 112343. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112343>.
3. Aliane, A.; Abboudi, S.; Seladji, C.; Guendouz, B. An Illustrated Review on Solar Absorption Cooling Experimental Studies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2016**, *65*, 443–458. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.012>.
4. Boretti, A.; Castelletto, S.; Al-Zubaidy, S. Concentrating Solar Power Tower Technology: Present Status and Outlook. In *Nonlinear Engineering*; 2018; pp 10–31. <https://doi.org/10.1515/nleng-2017-0171>.
5. Gantz, C. *Refrigeration : A History - North Carolina: McFarland & Company*; **2015**.
6. Wu, W.; Wang, B.; Shi, W.; Li, X. An Overview of Ammonia-Based Absorption Chillers and Heat Pumps. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *31*, 681–707. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.021>.
7. Gopalakrishnan, A.; Donald, C.; Erickson, E. M. Characterization of Ammonia–Water Absorption Chiller and Application. *Int. J. Air-Conditioning Refrig.* **2018**, *26* (4), 1850035. <https://doi.org/10.1142/S2010132518500359>.
8. Ibarra-Bahena, J.; Romero, R. J. Performance of Different Experimental Absorber Designs in Absorption Heat Pump Cycle Technologies: A Review. *Energies* **2014**, *7*, 751–766. <https://doi.org/10.3390/en7020751>.

9. Stoecker, W. F.; Saiz Jabardo, J. M. *Refrigeração Industrial*, Terceira e.; Blucher, **2018**.
10. Yokozeki, A. Theoretical Performances of Various Refrigerant-Absorbent Pairs in a Vapor-Absorption Refrigeration Cycle by the Use of Equations of State. *Appl. Energy* **2005**, *80*, 383–399. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.04.011>.
11. Riffat, S.; Aydin, D.; Powell, R.; Yuan, Y. Overview of Working Fluids and Sustainable Heating, Cooling and Power Generation Technologies. *International J. Low-Carbon Technol.* **2017**, *12* (4), 369–382. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctx008>.
12. Tien, C. *Adsorption Calculations and Modelling*; Butterworth-Heinemann, **1994**.
13. Sumathy, K.; Yeung, K. H.; Yong, L. Technology Development in the Solar Adsorption Refrigeration Systems. *Prog Energy Combust Sci* **2003**, *29* (4), 301–327. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00028-5).
14. Sun, J.; Fu, L.; Zhang, S. A Review of Working Fluids of Absorption Cycles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16* (4), 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.011>.
15. Anyanwu, E. E. Review of Solid Adsorption Solar Refrigeration II: An Overview of the Principles and Theory. *Energy Convers. Manag.* **2004**, *45* (7–8), 1279–95. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.08.003>.
16. Herold K. E.; Radermacher, R.; Klein, S. A. *Absorption Chillers and Heat Pumps*, 2 ed.; CRC Press: Florida, **2016**.
17. Li, M.; Xu, C.; Hassanien, R. H. E.; Xu, Y.; Zhuang, B. Experimental Investigation on the Performance of a Solar Powered Lithium Bromide–Water Absorption Cooling System. *Int J Refrig* **2016**, *71*, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023>.
18. Mazloumi, M. Naghashzadegan, M. Javaherdeh, K. Simulation of Solar Lithium Bromide-Water Absorption Cooling System with Parabolic Trough Collector. *Energy Convers. Manag.* **2008**, *49* (2820–32). <https://doi.org/10.1016%2Fj.enconman.2008.03.014>.
19. Fan, Y.; Luo, L.; Souyri, B. Review of Solar Sorption Refrigeration Technologies: Development and Applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2007**, *11* (8), 1758–1775. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2006.01.007>.
20. Ghaebi, H.; Shekari Namin, A.; Rostamzadeh, H. Performance Assessment and Optimization of a Novel Multi-Generation System from Thermodynamic and Thermo-economic Viewpoints. *Energy Convers. Manag.* **2018**, *165* (August 2017), 419–439. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.055>.
21. Khajepour, S.; Ameri, M. Techno-Economic Analysis of Using Three Fresnel Solar Fields Coupled to a Thermal Power Plant for Different Cost of Natural Gas. *Renew. Energy* **2020**, *146*, 2243–2254. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.075>.
22. Wang, D. C.; Li, Y. H.; Li, D.; Xia, Y. Z.; Zhang, J. P. A Review on Adsorption Refrigeration Technology and Adsorption Deterioration in Physical Adsorption Systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2010**, *14*(1), 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.08.001>.
23. El Fadar, A.; Mimet, A.; Pérez-García, M. Study of an Adsorption Refrigeration System Powered by Parabolic Trough Collector and Coupled with a Heat Pipe. *Renew. Energy* **2009**, *34* (10), 2271–2279. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.03.009>.
24. Hu, E. J. A Study of Thermal Decomposition of Methanol in Solar Powered Adsorption Refrigeration Machines. *Sol. Energy* **1998**, *62* (5), 325–329. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(98\)00012-7](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(98)00012-7).
25. Vasiliev, L. L.; Mishkinis, D. A.; Vasiliev Jr, L. L. Multi-Effect Complex Compound/Ammonia Sorption Machines. In *International Adsorption Heat Pump Conference, Montreal, Canada*; 1996; pp 3–8.
26. Guilleminot, J. J.; Poyelle, F.; Meunier, F. Experimental Results and Modeling Tests of an Adsorptive Air-Conditioning Unit. *ASHRAE Trans.* **1998**, *104* (Pt 1B, SF-98-21-1), 1543–1551.
27. Chua, T.; Ng, K. C.; Chakraborty, A.; Oo, N. M.; Othman, M. A. Adsorption Characteristics of Silica Gel + Water Systems. *J. Chem. Eng. Data* **2002**, *47*, 1177–1181. <https://doi.org/10.1021/je0255067>.
28. Wang, K.; Wu, J. Y.; Xia, Z. Z.; Li, S. L.; Wang, R. Z. Design and Performance Prediction of a Novel Double Heat Pipes Type Adsorption Chiller for Fishing Boats. *Renew. Energy* **2008**, *33*, 780–790. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2007.04.023>.
29. Yin, J.; Shi, L.; Zhu, M. S.; Han, L. Z. Performance Analysis of an Absorption Heat Transformer with Different Working Fluid Combinations. *Appl. Energy* **2000**, *67*, 281–292. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(00\)00024-6](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(00)00024-6).
30. Sun, J.; Fu, L.; Zhang, S. G. A Review of Working Fluids of Absorption Cycles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16* (4), 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.011>.
31. Deng, S. M.; Ma, W. B. Experimental Studies on the Characteristics of an Absorber Using LiBr/H<sub>2</sub>O Solution as Working Fluid. *Int. J. Refrig.* **1999**, *22* (4), 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(98\)00067-X](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(98)00067-X).

32. Srikkhirin, P.; Aphornratana, S.; Chungpaibulpatana, S. A Review of Absorption Refrigeration Technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2001**, *5* (4), 343–372. [https://doi.org/10.1016/s1364-0321\(01\)00003-x](https://doi.org/10.1016/s1364-0321(01)00003-x).
33. Kurosawa, S.; Yoshikawa, M. The Highest Efficiency Gas Direct-Fired Absorption Water Heater-Chiller. *ASHRAE Trans.* **1982**, *88* (Pt. 1), 401–415.
34. Grossman, G. Solar Powered Systems for Cooling, Dehumidification, and Air Conditioning. *Sol. Energy* **2002**, *72*, 53–62. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(01\)00090-1](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(01)00090-1).
35. Kalogirou, S. A. Solar Thermal Collectors and Applications. *Prog Energy Combust Sci* **2004**, *30* (2), 31–95. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>.
36. Bogart, M. *Ammonia Absorption Refrigeration in Industrial Processes*; **1981**.
37. Dossat, R. J.; Horan, T. J. *Principles of Refrigeration*; Pearson, 2001.
38. Li, M.; Xu, C.; Hassanien, R. H. E.; Xu, Y.; Zhuang, B. Experimental Investigation on the Performance of a Solar Powered Lithium Bromide–Water Absorption Cooling System. *Int. J. Refrig.* **2016**, *71*, 46–59. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2016.07.023>.
39. Tierney, M. J. Options for Solar-Assisted Refrigeration-Trough Collectors and Double Effect Chillers. *Renew. Energy* **2007**, *32*, 183–199. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.01.018>.
40. Mazloumi, M. Naghashzadegan, M. Javaherdeh, K. Simulation of Solar Lithium Bromide-Water Absorption Cooling System with Parabolic Trough Collector. *Energy Convers. Manag.* **2008**, *49*, 2820–2832. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.014>.
41. Ibrahim, N. I.; Khan, M. M. A.; Mahbubul, I. M.; Saidur, R.; Al-Sulaiman, F. A. Experimental Testing of the Performance of a Solar Absorption Cooling System Assisted with Ice-Storage for an Office Space. *Energy Convers. Manag.* **2017**, *148*, 1399–1408. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.07.001>.
42. Buonomano, A.; Calise, F.; D’Accadia, M. D.; Ferruzzi, G.; Frascogna, S.; Palombo, A. Experimental Analysis and Dynamic Simulation of a Novel High-Temperature Solar Cooling System. *Energy Convers. Manag.* **2016**, *109*, 19–39. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.047>.
43. Hang, Y.; Qu, M.; Winston, R.; Jiang, L.; Widyolar, B.; Poiry, H. Experimental Based Energy Performance Analysis and Life Cycle Assessment for Solar Absorption Cooling System at University of Californian. *Energy Build* **2014**, *82*, 746–757. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.07.078>.
44. Wasserscheid P, Welton T, E. *Ionic Liquids in Synthesis*. Weinheim, 2nd ed.; Wiley-VCH, **2007**. <https://doi.org/10.1002/9783527621194.ch1>.
45. Lei, Z.; Chen, B.; Koo, Y. M.; MacFarlane, D. R. Introduction: Ionic Liquids. *Chemical Reviews*, *117*(10),. *Chem. Rev.* **2017**, *117* (10), 6633–35. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00246>.
46. Zhou, H.; Lv, P.; Qi, H.; Ma, J.; Wang, J. Removal of Residual Functionalized Ionic Liquids from Water by Ultrasound-Assisted Zero-Valent Iron/Activated Carbon. *Environ. Technol.* **2018**, *2504–2512*. <https://doi.org/10.1080/09593330.2018.1444101>.
47. Yokozeki, A.; Shifflett, M. . B. Water Solubility in Ionic Liquids and Application to Absorption Cycles. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2010**, *49* (19), 9496–9503. <https://doi.org/10.1021/ie1011432>.
48. Kim, Y. J.; Kim, S.; Joshi, Y. K.; Fedorov, A. G.; Kohl, P. . A. Thermodynamic Analysis of an Absorption Refrigeration System with Ionic-Liquid/Refrigerant Mixture as a Working Fluid. *Energy* **2012**, *44* (1), 1005–1016. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.04.048>.
49. Wishart, J. F. Energy Applications of Ionic Liquids. *R. Soc. Chem. - Energy environmental Sci.* **2009**, *2*, 956–961. <https://doi.org/10.1039/B906273D>.
50. Kerlé, D.; Ludwig, R.; Geiger, A.; Paschek, D. Temperature Dependence of the Solubility of Carbon Dioxide in Imidazolium-Based Ionic Liquids. *J. Phys. Chem. B* **2009**, *113* (38), 12727–35. <https://doi.org/10.1021/jp9055285>.
51. Kim, S.; Kim, Y. J.; Joshi, Y. K.; Fedorov, A. G.; Kohl, P. A. Absorption Heat Pump/Refrigeration System Utilizing Ionic Liquid and Hydrofluorocarbon Refrigerants. *J. Electron. Packag.* **2012**, *134* (3), 031009. <https://doi.org/10.1115/1.4007111>.
52. Amde, M.; Liu, J. F.; Pang, L. Environmental Application, Fate, Effects, and Concerns of Ionic Liquids: A Review. *Environ. Sci. Technol.* **2015**, *49*, 12611–27. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03123>.
53. Taylor, R.; Coulombe, S.; Otanicar, T.; Phelan, P.; Gunawan, A.; Lv, W.; Rosengarten, G.; Prasher, R.; Tyagi, H. Small Particles, Big Impacts: A Review of the Diverse Applications of Nanofluids. *J. Appl. Phys.* **2013**, *113*, 011301. <https://doi.org/10.1063/1.4754271>.
54. Xuan, Y.; Li, Q. Heat Transfer Enhancement of Nanofluids. *Int. J. Heat Fluid Flow* **2000**, *21*, 58–64. [https://doi.org/10.1016/S0142-727X\(99\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0142-727X(99)00067-3).
55. Elsaid, K.; Olabi, A. G.; Wilberforce, T.; Abdelkareem, M. A.; Sayed, E. T. Environmental Impacts of Nanofluids: A Review. *Sci. Total Environ.* **2021**, *763*, 144202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144202>.

56. Wang, X. Q.; Mujumdar, A. S. Heat Transfer Characteristics of Nanofluids: A Review. *Int. J. Therm. Sci.* **2007**, *46*, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010>.
57. Minea, A. A.; Murshed, S. M. S. A Review on Development of Ionic Liquid Based Nanofluids and Their Heat Transfer Behavior. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2018**, *91*, 584–599. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.021>.
58. Buongiorno, J.; Hu, L. W.; Kim, S. J.; Hannink, R.; Truong, B. A. O.; Forrest, E. Nanofluids for Enhanced Economics and Safety of Nuclear Reactors: An Evaluation of the Potential Features, Issues, and Research Gaps. *Nucl. Technol.* **2008**, *162*, 80–91. <https://doi.org/10.13182/NT08-A3934>.
59. Beck, M. P.; Yuan, Y.; Warriar, P.; Teja, A. S. The Effect of Particle Size on the Thermal Conductivity of Alumina Nanofluids. *J. Nanoparticle Res* **2009**, *11*, 1129–1136. <https://doi.org/10.1007/s11051-008-9500-2>.
60. Khaleduzzamana, S. S.; Soheli, M. R.; Saidura, R.; Mahbubula, I. M.; Shahrula, I. M.; Akash, B. A.; Selvara, J. Energy and Exergy Analysis of Alumina–Water Nanofluid for an Electronic Liquid Cooling System. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2014**, *57*, 118–127. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2014.07.015>.
61. Sundararaja, S.; Manivannan, R. Comparative Energetic and Exergetic Analysis of Vapour Compression Refrigeration System with Au, HAuCl<sub>4</sub> and CNT Nanoparticles. *AIP Conf. Proc.* **2020**, *2270*, 110038. <https://doi.org/10.1063/5.0019669>.
62. Aramesh, M.; Pourfayaz, F.; Haghiri, M.; Kasaeian, A.; Ahmadi, M. H. Investigating the Effect of Using Nanofluids on the Performance of a Double-Effect Absorption Refrigeration Cycle Combined with a Solar Collector. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part A J. Power Energy* **2020**, *234* (7), 1–13. <https://doi.org/10.1177/0957650919889811>.
63. Wu, X.; Hu, S.; Mo, S. Carbon Footprint Model for Evaluating the Global Warming Impact of Food Transport Refrigeration Systems. *J. Clean. Prod.* **2013**, *54*, 115–124. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.04.045>.
64. Dinçer, I.; Kanoglu, M. *Refrigeration Systems and Applications*, 2nd ed.; Wiley, 2010.
65. Environmental Protection Agency (EPA). *Greenhouse Gas Inventory Guidance: Direct Fugitive Emissions from Refrigeration, Air Conditioning, Fire Suppression, and Industrial Gases*; 2014.
66. Lamnatou, C.; Chemisana, D. Concentrating Solar Systems: Life Cycle Assessment (LCA) and Environmental Issues. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *78*, 916–932. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.065>.
67. Fischer, S. K. Total Equivalent Warming Impact: A Measure of the Global Warming Impact of CFC Alternatives in Refrigerating Equipment. *Int. J. Refrig.* **1993**, *16* (6), 423–428. [https://doi.org/10.1016/0140-7007\(93\)90059-H](https://doi.org/10.1016/0140-7007(93)90059-H).
68. Sozen, A. Effect of Heat Exchangers on Performance of Absorption Refrigeration Systems. *Energy Convers. Manag.* **2001**, *42* (14), 1699–1716. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00151-5](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00151-5).
69. Jain, V.; Sachdeva, G.; Kachhwaha, S. S. Thermodynamic Analysis of Ejector-Assisted Vapour Compression–Absorption Hybrid Refrigeration System. *Int. J. Ambient Energy* **2019**, 1–10. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1562972>.
70. Pandya, B.; Patel, J.; Mudgal, A. Thermodynamic Evaluation of Generator Temperature in LiBr–Water Absorption System for Optimal Performance. *Energy Procedia* **2017**, *109*, 270–278. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.063>.
71. Winnik, S. *Corrosion Under Insulation (CUI) Guidelines*; Woodhead Publishing, 2016.
72. Mehrabi, M.; Yuill, D. Fouling and Its Effects on Air-Cooled Condensers in Split System Air Conditioners (RP-1705). *Sci. Technol. Built Environ.* **2019**, *25* (6), 1–12. <https://doi.org/10.1080/23744731.2019.1605197>.
73. Oh, J. S.; Binns, M.; Park, S.; Kim, J. K. Improving the Energy Efficiency of Industrial Refrigeration Systems. *Energy* **2016**, *112*, 826–835. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.119.a>

---

## Maria C. C Aguiar\* & Alex Vazzoler

Curso de Engenharia Química, Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil, SENAI/RJ/CETIQT.

\*E-mail: maclacarvalhoaguiar@gmail.com