

Originals recebidos em 31/01/2023. Aceito para publicação em 21/09/2023.
Avaliado pelo sistema *double blind peer review*. Publicado conforme normas da ABNT.
Open access free available online.
DOI: <https://doi.org/10.35700/2316-8382.2023.v1n13.3527>

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE DESTILAÇÃO DE ÁGUA EM CICLO FECHADO E SUBMETIDO À DESTILAÇÃO DE ÁGUA COM ELEVADA DUREZA

Jean Karlo Acosta Mendonça – <https://orcid.org/0000-0002-2163-6433>¹

Jurandir Fagundes Martins – <https://orcid.org/0000-0001-5144-6211>²

RESUMO

O grande desafio da humanidade é conciliar o seu desenvolvimento com a manutenção dos recursos naturais, de modo que as sucessivas gerações tenham o mesmo acesso a esses recursos. A água doce é um dos recursos naturais de grande importância, cujo uso deve estar em constante processo de melhoria. No Instituto Federal Farroupilha, os aparelhos destiladores dos laboratórios funcionam descartando a água que sobra do processo. Cada destilador descarta aproximadamente 50 L de água potável para destilar 1 L de água. O volume de descarte é muito alto considerando os números mensais ou anuais de desperdício, o que implica em gasto de recursos públicos e mau uso dos recursos hídricos. A cidade de São Vicente do Sul, no Rio Grande do Sul, tem a água com elevada dureza, em torno de 15 vezes maior do que cidades mais próximas a ela. A elevada dureza da água aumenta drasticamente a frequência de limpeza do destilador e reduz a durabilidade da sua resistência elétrica. Para minimizar essas três questões, construiu-se um sistema de ciclo fechado, no qual a água que entra no destilador e a que sai como descarte é a mesma contida em um reservatório de 210 (duzentos e dez) litros. Uma bomba de água envia a água do reservatório até o destilador, e o volume de água destilada sai desse sistema e gera a necessidade de reposição de água no reservatório. Este estudo também comparou o sistema proposto com um sistema aberto e os resultados mostraram uma economia de água, redução da frequência de limpeza e aumento da durabilidade do destilador.

Palavras-chave: Destilação da Água; Dureza da Água; Água Doce.

¹ Doutor em Química. Professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Câmpus São Vicente do Sul. E-mail: jean.mendonca@iffarroupilha.edu.br

² Estudante do Curso Superior de Licenciatura em Química no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Farroupilha, Câmpus São Vicente do Sul. E-mail: jurandirfagundes@gmail.com

DEVELOPMENT OF A CLOSED-CYCLE WATER DISTILLATION SYSTEM SUBMITTED TO HIGH HARDNESS WATER DISTILLATION

ABSTRACT

The great challenge facing humanity is to reconcile its development with the maintenance of natural resources, so that successive generations have the same access to these resources. Fresh water is one of the most important natural resources, the use of which must be in a constant process of improvement. At the Instituto Federal Farroupilha, the distillation equipment in the laboratories works by discarding the water left from the process. Each distiller discards approximately 50 liters of drinking water to distill 1 liter of water. The volume of disposal is quite high considering the monthly or annual numbers of waste, which implies the expenditure of public resources and misuse of water resources. The city of São Vicente do Sul, in Rio Grande do Sul, has water with high hardness, around 15 times higher than the cities closest to it. The high hardness of the water significantly increases the frequency of cleaning the distiller and reduces the durability of its electrical resistance. To minimize these three issues, a closed cycle system was built, in which the water that enters the distiller and that that leaves as waste is the same as that contained in a 210 (two hundred and ten) liters reservoir. A water pump sends the water from the reservoir to the distiller, and the volume of distilled water leaves this system and generates the need to adjust the water in the reservoir. This study also compared the proposed system with an open system and the results indicated water savings, reduced cleaning frequency and increased distiller durability.

Keywords: Water Distillation; Water Hardness; Fresh Water.

INTRODUÇÃO

O uso correto dos recursos naturais é uma constante preocupação que está parcialmente incorporada em nosso processo evolutivo. O conceito de “desenvolvimento sustentável” defende a necessidade de usarmos esses recursos possibilitando que gerações futuras tenham o mesmo acesso e seu uso gere desenvolvimento social e econômico com distribuição justa (ARAÚJO, 2016). Esse desafio é, constantemente, normatizado por organizações internacionais que, conseqüentemente, influenciam as políticas públicas locais (GONÇALVES; NASCIMENTO, 2021).

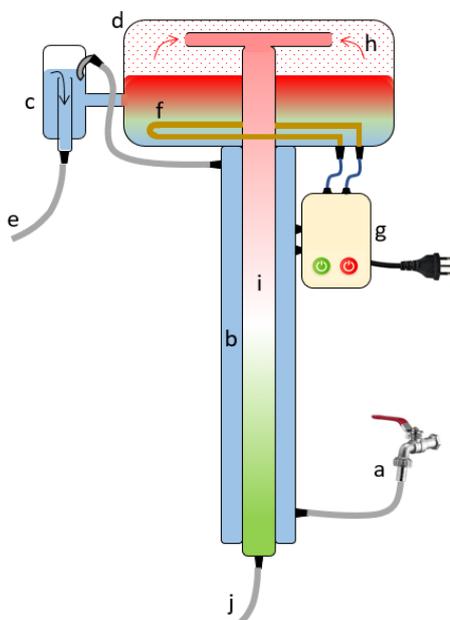
O percentual de água doce disponível em rios, lagos e outros reservatórios é de aproximadamente 1,1% do total de água existente no planeta (REBOUÇAS; BRAGA; TUNDISI, 2002). Os altos custos envolvidos na dessalinização da água do mar reforçam a necessidade do uso sustentável da água doce. Indicadores como “pegada hídrica”, que mede o consumo geral de água, e “água virtual”, que mede a quantidade de água necessária à produção, são ferramentas que auxiliam bastante na implementação de uma justiça socioeconômica, nas relações comerciais entre países (STIPP; ARANTES, 2017). Esses exemplos de quantificação do uso da água geram métricas importantíssimas que registram a eficiência do nosso desenvolvimento sustentável. Em recente trabalho, Soares et al. (2020) avaliaram a implementação da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), a qual contém dezessete Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), sendo o sexto objetivo referente à gestão sustentável da água. Os autores constataram que existe uma expectativa positiva

relacionada ao cumprimento desta Agenda no Brasil, dentro do prazo proposto, mas destacam que o ODS 6 ainda enfrenta a resolução de problemas antigos de abastecimento de água e saneamento básico.

A água é muito usada em laboratórios para as mais variadas finalidades, chegando até os laboratórios pelas vias do abastecimento urbano, contém contaminantes que precisam ser removidos por meio de alguns métodos de purificação, tais como: Filtração, Destilação, Ultravioleta, Deionização, Eletrodeionização, Micro/ultrafiltração e Osmose reversa (MENDES et al., 2011). O processo de purificação da água por Destilação consiste no aquecimento da água até o estado de fervura, no qual os vapores são deslocados para um ambiente mais frio capaz de condensá-los. Esse vapor condensado da água que ferveu é chamado de água destilada, um processo capaz de remover, substancialmente, a concentração de sólidos, íons, matéria orgânica, entre outros (KREMER et al., 2022).

O destilador de água mais usado é do tipo Pilsen, cuja forma estrutural está ilustrada na Figura 1, a seguir. Seu princípio de funcionamento pode ser entendido conforme destacado por meio das letras (a), (b), (c) e, assim, sucessivamente. O item (a) é o local de entrada de água no sistema de destilação. Inicialmente, a água chega ao sistema a uma temperatura ambiente, preenche uma coluna de resfriamento (b), com uma tubulação interna (i), que vem da parte superior do destilador. Após a água preencher todo o espaço (b), ela segue até o controlador de nível (c), conectado, hidráulicamente, à cuba de destilação (d). Esse controlador de nível tem uma tubulação interna, a qual permite o descarte do excesso de água (e), assim ele mantém a cuba de destilação sempre com o mesmo nível de água. Para um melhor entendimento, foi usada na Figura 1, a cor azul para ilustrar a água entrando no sistema, e um gradiente de coloração, dentro da cuba, para mostrar a água sendo fervida nesse ambiente. O aquecimento é realizado por uma resistência elétrica (f), controlada pela estação eletrônica (g). A cuba de destilação é fechada, portanto os vapores de água (h) têm apenas a tubulação (i) como caminho a ser percorrido. Tais vapores atravessam a longa tubulação (i), a qual tem as paredes resfriadas pela água que chega ao sistema a uma temperatura ambiente, e isso causa a condensação dos vapores de água. O gradiente de colorações por calor, usado na tubulação (i), mostra que a água destilada (na cor verde) sai do sistema pela tubulação (j) a uma temperatura mais elevada do que a de entrada.

Figura 1 - Destilador do tipo Pilsen: (a) entrada de água; (b) coluna de resfriamento; (c) nivelador do volume de água; (d) cuba de destilação; (e) saída do excesso de água; (f) resistência elétrica; (g) estação eletrônica; (h) vapor de água; (i) vapor de água que é destilado; e (j) saída da água destilada.



Os destiladores existem em vários tamanhos, e sua eficácia, conforme anunciada pelos fabricantes, é sempre o número de litros que ele é capaz de destilar em uma hora. Essa é uma métrica interessante, mas nunca é anunciada a quantidade de água de resfriamento necessária de passar pelo sistema, até que seja destilado um litro de água. Todos os trabalhos dedicados a estudar e propor melhorias aos sistemas de destilação do tipo Pilsen fazem essa medida e, com relação aos trabalhos citados neste artigo, a amplitude dos volumes de água gastos para destilar 1 L de água variaram de 16 a 65 L. Esta grande amplitude observada, na revisão bibliográfica, tem justificativa devido ao fato de que foram observações realizadas em destiladores de diferentes tamanhos e diferentes metodologias de medida. O estudo de Ziolkoski (2010) propôs reduzir o volume de água de resfriamento usada no processo e obteve um gasto de 16 L por litro de água destilada, conseguindo reduzir 63,6% do volume inicial observado. O trabalho de Silva (2019) apresentou valores de 65 L gastos por litro de água destilada, isso porque a metodologia considerou o volume de água descartada, em torno de 30 L, até o destilador começar a destilar a água.

Conforme abordado inicialmente, a gestão sustentável dos recursos hídricos é totalmente incompatível com o descarte de água em torno de 40 vezes o volume realmente destilado. Entre os trabalhos consultados, alguns não fizeram análises físico-químicas, na água de descarte e sugeriram que essa água fosse usada para outros fins. O estudo de Marckmann et al. (2012) sugeriu o uso da água para limpeza geral, e os estudos de Bonfim et al. (2016) e Silva et al. (2012) para o uso na lavagem de vidrarias do próprio laboratório. Entre os trabalhos que realizaram análises físico-químicas, todos concluíram que a potabilidade da água de descarte era muito próxima ao da água que entra no sistema. O trabalho de Rondon, Ribeiro e Silva (2017) sugeriu o reúso, nas atividades do laboratório de solos, já a pesquisa de Medeiros et al. (2017) sugeriu o uso para lavagem de modo geral, e Simões et al. (2020) e Nascimento, Lucena e Freire (2019) sugeriram o seu reúso sem citar aplicações.

Em uma busca no Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), encontrou-se a Patente de Invenção N° BR 102014032306-6, expedida em 27/04/2021, intitulada “Destilador de água compacto com eficiência máxima de reutilização de água” (MAIA; COSTA, 2014). Essa invenção consiste em um sistema de destilação com uma cuba de evaporação que recebe a água que vai ser destilada, diretamente da rede hidráulica do laboratório. Duas válvulas solenoides, localizadas na parte interna da cuba de evaporação, permitem que o nível de água se mantenha acima da resistência e abaixo da coleta dos vapores de água. Esses vapores de água são migrados para o condensador localizado logo abaixo da cuba de evaporação, mas o grande diferencial é que o líquido de arrefecimento usado no condensador, não é a água que vai para a cuba de evaporação, e, sim, um líquido isolado o qual tem apenas essa função e, inclusive, pode ser composto de diversas substâncias de arrefecimento. A segunda novidade deste sistema é que, acoplado lateralmente ao condensador, existe um radiador o qual resfria o líquido com o uso de ventiladores.

Além da aplicação de práticas sustentáveis de uso da água, nos processos de destilação, existe uma propriedade da água que pode dificultar esse processo. Segundo Baccan et al. (2001), a concentração de cátions divalentes na água, oriundos, principalmente, de sais carbonato, gera uma propriedade conhecida como dureza da água. Os cátions em maior abundância são Ca^{2+} e Mg^{2+} , a dureza ainda pode ser classificada em “dureza temporária”, oriunda da presença de sais carbonatos e bicarbonatos, e “dureza permanente”, oriunda de sais cloretos, nitratos e sulfatos. Normalmente, a maior fração da dureza da água vem da dureza temporária e, durante o processo de fervura da água, na cuba de evaporação do destilador, os carbonatos de cálcio e magnésio precipitam-se e adsorvem-se, nas superfícies internas, incluindo a resistência de aquecimento. Existem estudos, como o de Stärka et al. (2017), que se aprofundam no processo de incrustação de sais em diferentes superfícies metálicas, usadas em destiladores de água do mar, assim como há estudos dedicados ao processo de abrandamento da dureza da água, como, por exemplo, o trabalho de Silva et al. (2015), que propôs o uso de materiais celulósicos capazes de adsorver o Ca^{2+} , como uma das alternativas ao método de abrandamento mais usado que é a troca iônica.

O município de São Vicente do Sul, localizado no Rio Grande do Sul, apresenta valores elevados de dureza da água, em torno de 190 mg/L de CaCO_3 . Essa concentração é um problema para instrumentos que trabalham com a água em altas temperaturas, sejam eles domésticos como, por exemplo, chuveiros, ebulidores, chaleiras,

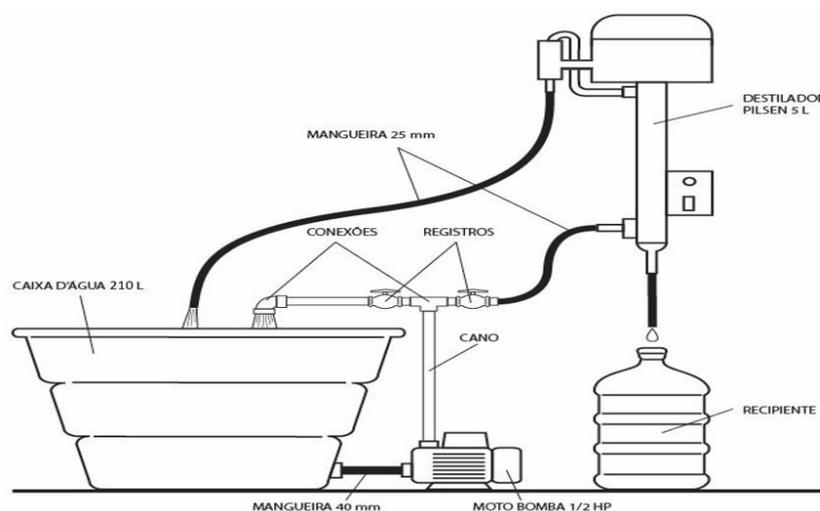
encanamentos de água quente, ou instrumentos industriais, como as caldeiras e as suas tubulações de distribuição do calor. Nos laboratórios de química, existem também instrumentos como banho-maria, cuba de aquecimento do rotaevaporador e o destilador de água. Em todos esses instrumentos ocorre o fenômeno da precipitação dos sais de carbonato de cálcio e magnésio, incrustando as superfícies internas e, algumas vezes, isso gera dificuldade da passagem da água, entupimentos e superaquecimento das resistências elétricas. Os destiladores de água, que recebem a água de São Vicente do Sul, precisam ser lavados com uma frequência muito grande e, mesmo assim, o tempo de vida de suas resistências elétricas é reduzido. Diante dessa realidade, este trabalho propôs-se a desenvolver um sistema de destilação que não descarta a água de refrigeração que sai do sistema de destilação, visando, com isso, não desperdiçar água, diminuir a frequência de lavagem do destilador e aumentar o tempo de duração da resistência elétrica.

METODOLOGIA

Os materiais utilizados para a construção do sistema de destilação foram: destilador da marca LUCADEMA tipo PILSEN, modelo LUCA 05 L de 3500 W de potência, 1 caixa d'água de PVC 210 L, 1 motobomba de 1/2 hp, 10 m de mangueira com diâmetro de 25 mm, 30 cm de mangueira com diâmetro de 40 mm, 2 registros de pressão com diâmetro de 25 mm, Cano de PVC com diâmetro de 25 mm e conexões, 1 tubo de cola plástica, 1 rolo de veda-rosca e braçadeiras de metal. Os outros materiais usados neste estudo foram: condutímetro portátil de marca INSTRUTHERM, modelo CD-830 com faixa de leitura de 0 a 20 mS, termômetro químico de escala interna de marca INCOTERM-MYLABOR com escala de -10 a +150°C, bureta de 25 mL, pipeta volumétrica de 50 mL, erlenmeyer de 100 mL, proveta de 1 L, solução padronizada de EDTA 0,01 M da marca ÊXODO CIENTÍFICA, solução tampão pH = 10 marca DINÂMICA, indicador negro de Eriocromo T da marca NEON, e água destilada e deionizada.

O sistema de destilação montado, neste estudo, está ilustrado na Figura 2, a seguir. O funcionamento do processo inicia-se enchendo o reservatório de 210 L com água da torneira, liga-se a motobomba e regulam-se os dois registros, logo acima do cano de saída da água, de modo que a vazão de saída descrita na letra (e), da Figura 1, mantenha-se na vazão suficiente ao ponto de possibilitar a condensação dos vapores de água. A vazão de saída de água da motobomba é superior à vazão exigida pelo destilador. Assim o excedente dessa vazão retorna para a caixa d'água. Após ajustada a vazão, liga-se o destilador e, após alguns minutos, o processo de destilação de água inicia. Ao final de um processo de destilação de água, repõe-se água da torneira na caixa d'água até o nível inicial.

Figura 2 - Protótipo do sistema de destilação em ciclo fechado.



Fonte: Autores (2023).

A otimização deste sistema foi realizada após algumas observações do seu funcionamento, sendo elas: 1º) ajuste e quantificação do fluxo da água de resfriamento; 2º) determinação do aumento da temperatura da água na caixa d'água e a consequente otimização do volume de água que poderá ser destilado de forma ininterrupta.

As próximas observações foram feitas ao longo da destilação de 300 L de água, com medidas realizadas antes de começar e em intervalos de 20 L de água destilada, sendo elas: 3º) variação da dureza da água, na caixa d'água, determinada por volumetria de complexação com EDTA (0,005 M) que titulava, exatamente, 50 mL de amostra, após a adição de 4 mL de solução tampão (pH=10) e 3 gotas da solução do indicador negro de Eriocromo T (1%); 4º) observação e registro de imagens da parte interna da cuba de destilação descrita na letra (d) da Figura 1, quando submetida a destilar pelo sistema proposto, em comparação a destilação em um sistema aberto que descarta a água de resfriamento; 5º) quantificação da condutividade na água da caixa d'água, com o uso de um condutivímetro.

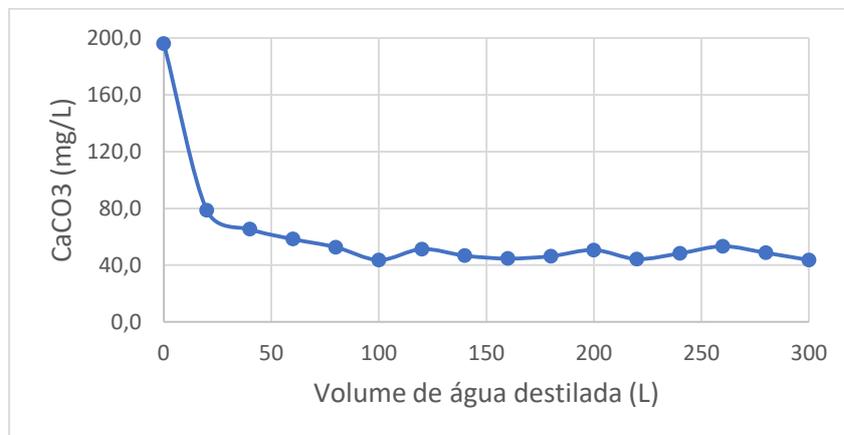
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A vazão da água de resfriamento que sai do destilador, descrita na letra (e) da Figura 1, foi quantificada medindo o tempo necessário para encher uma proveta de 1 L. O resultado obtido foi de 18 s, e que significa que a vazão de descarte é de 3,3 L/min. Para transformar esse resultado na mesma unidade de vazão, citada em todos os outros estudos sobre a eficiência dos destiladores, foi medido o tempo que o destilador usado neste estudo precisa para destilar 1 L de água. Esse tempo foi de 14 min, e isso significa que, nesse intervalo de tempo, foram descartados 46,6 L de água de resfriamento, ou seja, a vazão da água de resfriamento ficou em 46,6 L para destilar 1 L de água. Essa medida não considerou a quantidade de água descartada entre o intervalo de tempo no qual se liga o destilador e que começa a obtenção da água destilada.

Os destiladores precisam ficar recebendo água de resfriamento não só para resfriar os vapores de água, mas também para fornecer a água que será vaporizada e, posteriormente, destilada. Além disso, precisam manter a resistência elétrica submersa, a fim de evitar o seu superaquecimento e a consequentemente ruptura. Um artifício de proteção dos destiladores para evitar isso é a instalação de um termostato, na coluna de resfriamento, descrita na letra (b) da Figura 1. A temperatura da água, na câmara de resfriamento, subirá bastante, caso o destilador pare de receber água de refrigeração, na entrada (a) da Figura 1. Os fabricantes de destiladores definem uma temperatura limite da água de resfriamento, e após esse valor, o circuito eletrônico do destilador desliga a resistência elétrica como proteção. Considerando essa funcionalidade do destilador e a vazão de água de refrigeração calculada anteriormente, pode-se estimar que todo o volume da caixa d'água (210 L) passará 2,2 vezes pelo destilador para destilar 10 L de água. Foi observado também que o sistema de proteção do destilador usado, neste estudo, desliga a resistência do destilador, quando a temperatura da água, na caixa d'água, atinge 50°C. Isso acontecia, quando o sistema proposto destilava constantemente entre 12 e 16 L de água. Essa variação está associada à temperatura ambiente da água, consequentemente, dependente das estações climáticas. Para evitar que a temperatura da água atinja o limite aceito pelo destilador, foi montado um Procedimento Operacional Padrão (POP) do sistema de destilação proposto, com uma das instruções de uso, a condição de destilar no máximo 10 L de água por dia.

A determinação da dureza da água na caixa d'água, ao longo de um processo de destilação de 300 L de água, realizada em intervalos de destilação de 20 L, por volumetria de complexação com EDTA, apresentou os resultados ilustrados na Figura 3, a seguir. As 16 análises foram realizadas em triplicatas, os desvios padrões relativos (RSD) dessas triplicatas oscilaram entre 0,73 e 1,35%.

Figura 3 - Dureza da água de resfriamento durante o processo de destilação de 300 L de água.



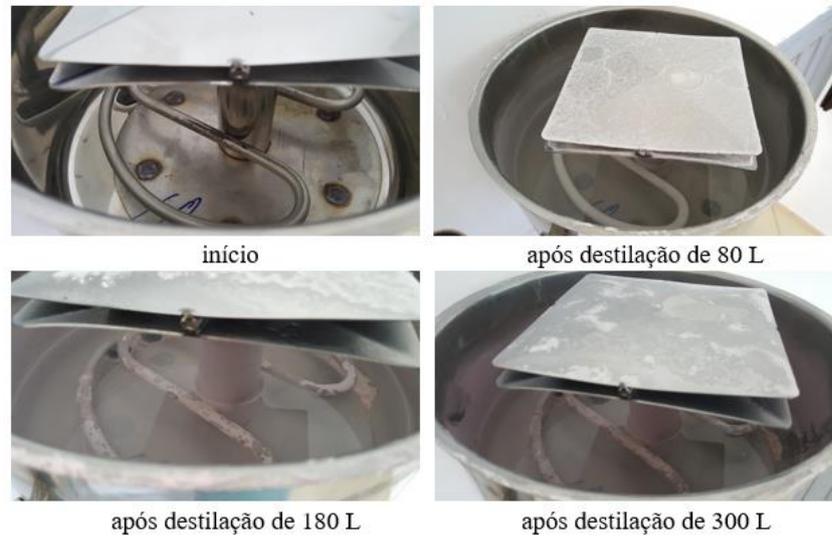
Fonte: Autores (2023).

Os resultados mostram que a dureza da água que chega inicialmente ao destilador é próxima de 200 mg/L de CaCO₃ e, após a destilação de 20 L de água, essa dureza foi reduzida para, aproximadamente, 80 mg/L e, ao destilar 100 L, esse valor chegou muito próximo de 40 mg/L. A explicação para tais resultados é porque os carbonatos de cálcio e de magnésio, responsáveis pela maior parte da dureza da água, não são solúveis em elevadas temperaturas, portanto o processo de fervura, na cuba de destilação, precipita os sais, e, conseqüentemente, reduz a sua concentração na fase líquida.

Esses sais de carbonato formam crostas nas paredes internas da cuba de destilação, descrita na letra (d) da Figura 1, e decantam na caixa d'água. A partir dos 100 L de água destilada até a destilação de 300 L, observa-se que a dureza da água de resfriamento que está na caixa d'água manteve-se praticamente constante, mas com uma leve oscilação. Acredita-se que isso ocorreu devido ao fato de que, sempre após a destilação de 20 L de água, o volume de água da caixa d'água era repostado até os 210 L. Essa reposição envolve o volume destilado e o volume evaporado, na própria caixa d'água, que está em um sistema aberto e, durante os momentos de destilação, a temperatura da água está elevada. Os resultados mostram que as reposições de água com dureza, próxima a 200 mg/L, não são suficientes para elevar a níveis da dureza da água de resfriamento, para valores além de 55 mg/L.

O processo de acumulação de sais de carbonato, na parte interna da cuba de destilação, foi analisado na forma de imagens, após a destilação de frações de 20 L de água. Essas observações foram realizadas, inicialmente com o sistema de destilação fechado, ilustrado na Figura 2, e com um sistema aberto que descarta a água de refrigeração saída do destilador. Foram feitos vários registros fotográficos durante as avaliações, dentre os quais foram escolhidos quatro para representar o que ocorreu em cada uma das situações propostas de destilação. A Figura 4, a seguir, apresenta as imagens internas da cuba de destilação, durante seu uso no sistema fechado de destilação.

Figura 4 - Cuba de destilação no sistema fechado.



Fonte: Autores (2023).

A primeira imagem, com a cuba de destilação limpa, facilita a comparação com as demais três imagens que demonstram a crescente acumulação de sais de carbonato nas paredes internas da cuba, na resistência do destilador e até na parte superior do duto captador dos vapores de água, os quais serão destilados. Em nenhum momento desse processo, a cuba de destilação foi limpa ou sofreu qualquer interferência.

Os resultados obtidos com o mesmo estudo em um sistema aberto, pode ser visto na Figura 5, a seguir.

Figura 5 - Cuba de destilação no sistema aberto.



Fonte: Autores (2023).

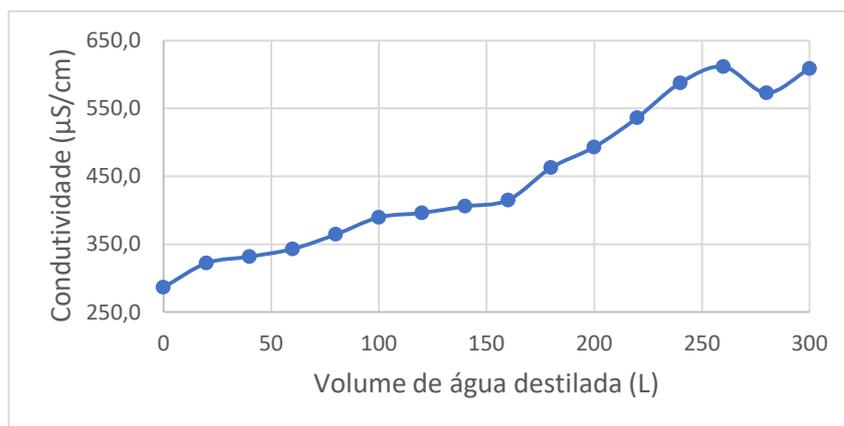
Conforme os resultados anteriores apresentaram, a destilação de água, em um sistema aberto, fará com que o destilador receba água sempre a uma dureza próxima a 200 mg/L. Essa realidade já apresentou, após a destilação de 80 L, diferenças visuais na quantidade de acúmulo de sais de carbonato nas paredes internas da cuba de

destilação. Durante o processo de destilação entre 80 e 100 L, a conexão hidráulica do controlador de nível com a cuba de destilação, descrito na letra (c) da Figura 1, e destacada com círculo vermelho na Figura 5, foi obstruída pelo acúmulo de sais de carbonato, ocasionando o desligamento automático pelo sistema de proteção do destilador. Após esse evento, foi realizada uma intervenção somente para desentupir a conexão. Após a destilação de 180 L de água, a quantidade de sais de carbonato depositada, na parte interna da cuba de destilação, já é muito superior, quando comparada a mesma situação no sistema de destilação fechado.

Durante o processo de destilação entre 220 e 240 L, a resistência do destilador rompeu-se completamente, como pode ser visualizado na Figura 5. O destilador tem proteção automática da sua resistência, para que ela não funcione sem estar imersa na água, mas não existe um controle sobre o fato de a resistência estar envolvida por uma camada salina. A crosta de sais, sob a superfície da resistência, reduz a sua capacidade de transferência de calor, diminui a sua eficiência, e isso acarreta uma sobrecarga que, conseqüentemente, reduz seu tempo de duração.

A determinação da condutividade da água, na caixa d'água, ao longo de um processo de destilação de 300 L de água, realizada em intervalos de destilação de 20 L, por meio do uso de um condutímetro, apresentou os resultados ilustrados na Figura 6, a seguir. As 16 análises foram realizadas sempre antes de iniciar o processo de destilação, de modo que a água de resfriamento estivesse sob temperatura ambiente.

Figura 6 - Condutividade da água de resfriamento durante o processo de destilação de 300 L de água.



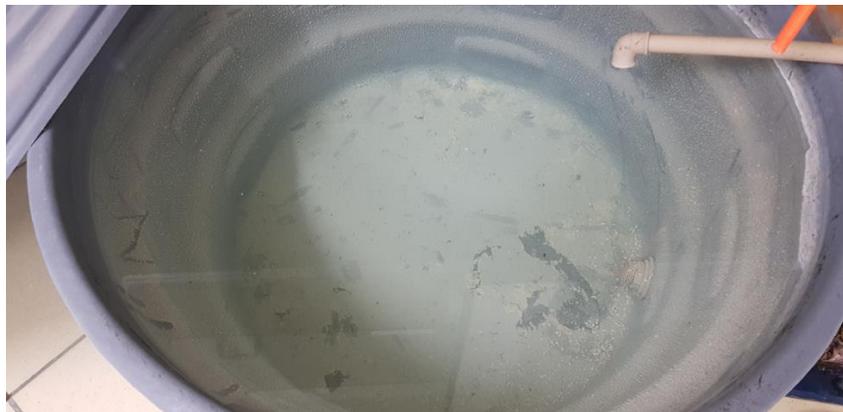
Fonte: Autores (2023).

As medidas de condutividade da água de resfriamento demonstram o nível da presença iônica na água, de modo que existe uma proporcionalidade entre a concentração salina da água e sua capacidade de facilitar o fluxo de elétrons. Os resultados obtidos mostraram que a condutividade da água de resfriamento sofreu um constante crescimento ao longo das destilações, e apresentou uma possível estabilidade, a partir da destilação de 260 L. O crescente aumento da concentração iônica solúvel na água, dá-se pelo fato de que o volume de água do reservatório sofre sucessivas remoções do solvente (água) a cada processo de destilação a que ele é submetido, além das reposições de água com alta concentração de íons. É importante destacar que os resultados de aumento da condutividade elétrica e redução da dureza da água, observados na água de resfriamento, não são incoerentes. A expressiva redução da dureza da água só provou que a origem da dureza era de sais de cátions divalentes com os ânions carbonato ou bicarbonato, o que é conhecida como “dureza temporária”, já que esses sais são pouco solúveis, sob elevadas temperaturas, e não eram de origem de sais de cloretos, nitratos e sulfatos, conhecidos como “dureza permanente”, os quais são solúveis sob altas temperaturas.

Ainda avaliando o sistema de destilação desenvolvido, embora tenha-se dado destaque sobre o acúmulo de sais na parte interna da cuba de destilação, a Figura 7, a seguir, mostra que é bem maior a quantidade de sais que precipitaram na caixa d'água de reservatório. Acredita-se que isso aconteça devido à grande recirculação da água de resfriamento a qual também tem contato com a água interna da cuba de destilação, e, também, porque a

temperatura da água de resfriamento chega a aproximadamente 50°C, suficiente para precipitar parte da dureza temporária da água. Esses sais precipitados apresentam uma granulometria alta, ao ponto de não ficarem em suspensão na caixa d'água, mesmo quando a motobomba é ligada para se iniciar um novo processo de destilação.

Figura 7 - Sais oriundos da dureza temporária da água, precipitados na caixa d'água de 210 L.



Fonte: Autores (2023).

De maneira geral, os resultados obtidos nos permitem afirmar que a vazão de água de resfriamento, quase 50 L de água para destilar 1 L de água, foi uma consequência devido à elevação da temperatura da água ao longo do processo de destilação. O uso de registros hidráulicos, para ajustar a vazão da água, pode ser substituído pelo dimensionamento de uma motobomba com vazão perfeitamente ajustada à necessidade do sistema. A elevada dureza da água e os acúmulos de sais, na parte interna da cuba de destilação, muito provavelmente, apresentariam problema nas válvulas solenoides usadas no “Destilador de água compacto com eficiência máxima de reutilização de água” (PI BR 102014032306-6), de modo que o acúmulo dos sais poderia imobilizar o êmbolo que permite a passagem ou não da corrente elétrica pela bobina da válvula.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os destiladores de água do tipo Pilsen apresentam um alto descarte de água em relação ao volume destilado. Em decorrência disso, existem muitas iniciativas de reaproveitamento de água de refrigeração rejeitada, e alguns desenvolvimentos de novos destiladores que não descartam a água de refrigeração, mas que não tiveram seus processos de registro de propriedade industrial concluídos, por diferentes motivos. O sistema de destilação fechado, aqui proposto, necessitou ter a vazão de água de refrigeração elevada, mas nesse caso, isso não representa um problema já que ela é totalmente reutilizada.

O sistema proposto foi construído de forma simples, com materiais acessíveis e de fácil reprodução. Os resultados obtidos neste trabalho já permitem projetar algumas simples alterações que podem ser feitas como, por exemplo, aumentando o volume do recipiente que acondiciona a água de resfriamento aumentará o tempo de elevação da temperatura da água, que vai ampliar o tempo de uso constante de destilação e permitirá, ainda, destilar ininterruptamente um volume maior de água. Além disso, substituindo os registros de controle de vazão de água por uma motobomba com vazão exata ao dimensionamento necessário, dará uma praticidade ao processo, mas trará uma limitação, caso seja necessário mudar o tamanho do destilador. Uma alteração, um pouco mais elaborada, seria criar um sistema de refrigeração acoplado ao reservatório de água, de modo a evitar a elevação da temperatura. Isso permitiria que o sistema proposto pudesse ser usado constantemente, por tempo mais prolongado. Vale destacar que, se por um lado, a inclusão de mais um sistema de refrigeração aumentaria o gasto energético do processo de destilação, por outro, permitiria a destilação de grandes volumes diários de água.

Estas alterações sugeridas dependem da necessidade diária de água destilada, mas para grande parte dos laboratórios o volume de 10 L é suficiente.

Além de evitar o descarte de água, o sistema proposto mostrou um bom desempenho na destilação de água com elevada dureza e possibilita uma grande prorrogação dos intervalos de limpeza do destilador. Para exemplificar isso, o POP, desenvolvido para o sistema proposto, prevê a limpeza do destilador após a destilação de 200 L. Esse valor escolhido tem uma grande margem de segurança, mesmo sendo o dobro do volume usado anteriormente, quando a água de refrigeração era descartada.

Existe um esforço mundial do uso sustentável dos recursos hídricos, com grande destaque para a água doce. Acredita-se que este sistema de destilação de água, em ciclo fechado, esteja alinhado com práticas de sustentabilidade ambiental que são, constantemente, monitoradas por organizações internacionais.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Instituto Federal Farroupilha, pelo apoio estrutural recebido, e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul, pela bolsa de iniciação científica.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Sérgio Murilo Santos de. Desenvolvimento sustentável, ética e sustentabilidade econômica mundial. **Revista Geotemas**, v. 6, n. 2, p. 60–70, 2016. Disponível em: <http://periodicos.apps.uern.br/index.php/GEOTemas/article/view/739>. Acesso em: 05 dez. 2022.

BACCAN, Nivaldo; ANDRADE, João Carlos; GODINHO, Oswaldo Espírito Santo; BARONE, José Salvador. **Química Analítica Quantitativa Elementar**. 3ª Edição, São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 2001.

BONFIM, Thays Rejane Silva; MAIA, Carlos Henrique; RIBEIRO, Rênystton de Lima; ARAÚJO, Weliton Eduardo Lima de; ROCHA, Nattacia Rodrigues Araujo Felipe. Reaproveitamento da água de refrigeração de destilador para lavagem de vidrarias em laboratório de análise química. **XVII Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Florianópolis/SC – 6 a 8 junho, 2016. Disponível em: <https://abesnacional.com.br/XP/XP-EasyArtigos/Site/Uploads/Evento32/TrabalhosCompletoPDF/II-161.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.

GONÇALVES, Pascoal Teófilo Carvalho; NASCIMENTO, Bruno Domingos do. A ONU e a difusão do desenvolvimento sustentável: o caso brasileiro. **Revista Monções**, Dourados, MS, v. 10, n. 19, p. 187-214, 2021. DOI: <https://doi.org/10.30612/rmufgd.v10i19.13085>. Acesso em: 07 dez. 2022.

KREMER, Delcio Pedro; BORGES, Jéssica de Oliveira Andrade; ALVES Ana Cláudia Tasinaffo. Materiais alternativos no ensino de química: o uso do destilador artesanal para ensinar mudanças de fases da água. **Gnosis Carajás**, v. 2, n. 1, e22005, 2022. DOI: <https://doi.org/10.55723/gc.v2i1.24>. Acesso em: 20 dez. 2022.

MAIA, Josemir Moura; COSTA Poti Oliveira Cortêz, (Inventores); Universidade Estadual da Paraíba (Titular). **Destilador de água compacto com eficiência máxima de reutilização de água**. Instituto Nacional de Propriedade Industrial INPI, Carta Patente N° BR 102014032306-6, Prazo de validade: 20 (vinte) anos contados a partir de 22/12/2014.

MARCKMANN, Karina; TUBINO, Rejane Maria Candiota; KRELING, Monica Tagliari; CAMPANI, Darci Barnech. Propostas para redução de desperdícios ambientais numa Universidade Pública – Projeto de reutilização de água de destiladores no CT – Leme. **3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio**

Ambiente, Bento Gonçalves/RS - 25 a 27 de abril de 2012. Disponível em: <https://siambiental.ucs.br/congresso/anais/trabalhosTecnicos?ano=2012>. Acesso em: 09 jan. 2023.

MEDEIROS, Raphael Corrêa; STORCK, William Rosso; VOLPATTO, Fernanda. Gestão da água de descarte de destiladores de água em laboratórios de uma IES. **VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Campo Grande/MS - 27 a 30 novembro, 2017. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/I-015.pdf>. Acesso em: 16 jan. 2023.

MENDES, Maria Elizabete; FAGUNDES, Carla Costa; PORTO, Cláudio Campos do; BENTO, Laiz Cameirão; COSTA, Thiago Guarato Rodrigues; SANTOS, Ricardo Alexandre dos; SUMITA, Nairo Massakazu. A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico. **J Bras Patol Med Lab**, v. 47, n. 3, p. 217-223, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/jbpml/a/8sgJW4hxRbjp5QCqyY9Q4hx/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 dez. 2022.

NASCIMENTO, Francisca Givanilda Rodrigues do; LUCENA, Clarisse Maria Lima; FREIRE, Letícia Lacerda. Reúso em laboratórios de análises ambientais: desperdícios e custos da água residual de destiladores. **Revista de Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 8, n. 2, p. 578-594, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19177/rgsa.v8e22019578-594>. Acesso em: 20 jan. 2023.

REBOUÇAS, Aldo da Cunha; BRAGA, Jr. Benedito Pinto Ferreira; TUNDISI, José Galizia. **Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação**. São Paulo: Escrituras Editora, 2002.

RONDON, Henrique Alexandre; RIBEIRO JUNIOR, Ilço; SILVA, Marcel Ramos da. Implantação de um sistema de reúso da água residual do aparelho destilador para laboratório de solos do IFMT, **5º Encontro em Engenharia da Edificação Ambiental**, Cuiabá/MS - 21 a 22 de novembro, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Ilco-Ribeiro-Junior/publication/323969462_IMPLANTACAO_DE_UM_SISTEMA_DE_REUSO_DA_AGUA_RESIDUAL_DO_APARELHO_DESTILADOR_PARA_LABORATORIO_DE_SOLOS_DO_IFMT/links/5ab54a77aca2722b97cacb1a/IMPLANTACAO-DE-UM-SISTEMA-DE-REUSO-DA-AGUA-RESIDUAL-DO-APARELHO-DESTILADOR-PARA-LABORATORIO-DE-SOLOS-DO-IFMT.pdf. Acesso em: 13 jan. 2023.

SILVA, Jéssica. **Sustentabilidade aplicada a partir do reaproveitamento de água no IFPB**. Trabalho de Conclusão de Curso – Bacharelado em Engenharia Civil, Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifpb.edu.br/xmlui/bitstream/handle/177683/1400/TCC%20-%20J%20c3%a9ssica%20Silva.PDF?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 23 dez. 2022.

SILVA, Marilda da; SILVA, Keylyane Santos da; ANGELINI, Lucas Peres; OLIVEIRA, Adriana Paiva de. Reúso da água de refrigeração de destiladores para lavagem de vidrarias em laboratórios de ensino do IFMT campus Cuiabá Bela Vista. **III Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental**, Goiânia/GO - 19 a 22 de novembro, 2012. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/I-007.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2023.

SILVA, Brunela; BOTELHO, Lorenna; SILVA, Deusanilde; SOUSA, Rita de Cássia; BELATTO, Carlos; MENDONÇA Neto, Abelardo. Adsorção de íons cálcio (Ca²⁺) provenientes da água dura em materiais celulósicos; **48º International Pulp and Paper Congress & 1º Ibero-American Conference on the Bio-Economy**, São Paulo/SP - 6 a 8 de outubro, 2015. Disponível em: https://www.eucalyptus.com.br/artigos/2015_Adsorzao+Calcio.pdf. Acesso em: 30 jan. 2023.

SIMÕES, Francisca Adriana Fernandes; FREITAS, Cley Anderson Silva de; FEITOSA, Robson Gonçalves Fechine; SANTOS, Yannice Tatiane da Costa; COSTA, Laisa Daiana Alcântara; PINHO, Camila de Oliveira; SILVA, Maria Lucilene Queiroz da; SANTOS, Suélho Pereira dos. Potencial de reúso das águas de resfriamento de destiladores laboratoriais. **Revista Eletrônica De Gestão E Tecnologias Ambientais**, v. 8, n. 1, p. 180-194, 2020. DOI: <https://doi.org/10.9771/gesta.v8i1.36627>. Acesso em: 19 jan. 2023.

SOARES, Dhandra Lino; TEIXEIRA, Maria Oliveira; FERREIRA, Maria Inês Paes; SILVA NETO, Romeu. Desafios para a implementação da Agenda 2030 à luz da gestão sustentável das águas. **Campos dos Goytacazes/RJ**, v. 14, n.2 p. 209-234, 2020. DOI: <https://doi.org/10.19180/2177-4560.v14n22020p209-234>. Acesso em: 15 dez. 2022.

STÄRKA, Alexander; KRÖMERA, Kerstin; LOISELB, Katell; ODIOTB, Karine; NIEDB, Stephan; GLADEA, Heike. Impact of Tube Surface Properties on Crystallization Fouling in Falling Film Evaporators for Seawater Desalination, **Heat Transfer Engineering**, Dublin, Ireland, v. 38, n. 7-8, p. 762-774, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457632.2016.1206418>. Acesso em: 26 jan. 2023.

STIPP, Nilza Aparecida Freres; ARANTES, Marcia Regina Lopez. A nomenclatura dos usos da água no Brasil e a interação com a percepção da população consumidora frente aos conceitos de água virtual e pegada hídrica. **Geografia**, Rio Claro, v. 42, n. 2, p. 191-204, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5016/geografia.v42i2.13078>. Acesso em: 13 dez. 2022.

ZIOLKOSKI, Michele. **Avaliação do desempenho de destiladores visando a redução do consumo de água e energia**. Trabalho de Conclusão de Curso – Matemática, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Erechim, 2010. Disponível em: https://www.uricer.edu.br/cursos/arq_trabalhos_usuario/1269.pdf. Acesso em: 22 dez. 2022.