

PROJETO DE UM EXPERIMENTO DE DESSALINIZAÇÃO DE ÁGUA VIA DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS COM VÃO DE AR (AGMD)

Victor Naveira Figueiredo, victor_naveira@id.uff.br
Kleber Marques Lisboa, kmlisboa@id.uff.br

Laboratory of Thermal Sciences (LATERMO), Department of Mechanical Engineering (TEM/PGMEC),
Universidade Federal Fluminense, UFF, Rua Passo da Pátria, 152-470, São Domingos, Niterói, RJ, 24210-240

Resumo. A pesquisa é centrada no projeto e implementação de um sistema de dessalinização de água usando destilação por membranas com vão de ar (AGMD, na sigla em inglês) de bancada. Os experimentos servirão para entender como os diferentes fenômenos de transporte envolvidos e suas interações resultam na quantidade de água produzida. O objetivo final principal é a avaliação de qual dentre os mecanismos de transferência de calor e massa é o maior empecilho para ganhos de desempenho significativos em sistemas AGMD, subsidiando pesquisas futuras com foco em intensificar os processos que impõem os maiores limites à produtividade de água. Neste relato, apresenta-se o projeto da bancada experimental e as etapas preliminares de aquisição de equipamentos e insumos e montagem. Um dos princípios norteadores do projeto da bancada é a versatilidade, tanto geométrica quanto de configuração. Para garantir a flexibilidade necessária, os módulos de dessalinização são concebidos usando aplicativos de desenho computacional e fabricados por manufatura aditiva usando impressão 3D por modelagem por deposição de material fundido (FDM, na sigla em inglês). Ademais, são apresentados instrumentos e equipamentos selecionados e já disponíveis para montagem.

Palavras chave: Dessalinização, destilação por membranas, convecção, condensação, AGMD.

Abstract. This research is focused in the project and implementation of a bench experiment for water desalination using air gap membrane distillation (AGMD). The experiments will serve to further understand how the different transport phenomena involved and their interactions result in the quantity of water produced. The main final objective is the evaluation of which among the heat and mass transfer mechanisms poses the main barrier for significant performance gains in AGMD systems, enabling future research focused in intensifying processes that limit the most water productivity. In this report, a design of an experimental bench and the preliminary steps to acquire equipment and materials and assemble the apparatus. One of the main principles taking into account for the design of the experiment is versatility, either geometric or in terms of configuration. To warrant the needed flexibility, the desalination modules are conceived using computational design applications and fabricated through additive manufacturing using 3D printing by fused deposition modeling (FDP). Furthermore, the selected instruments and equipment already available are presented.

Keywords: Desalination, membrane distillation, convection, condensation, AGMD.

1. INTRODUÇÃO

A abundância de água na superfície da Terra é clara. Entretanto, a maior parte da água disponível no planeta não é apropriada para consumo humano. De fato, apenas 1% está ao alcance do consumo humano. Agravando este cenário, o estoque de água potável está progressivamente se esgotando em razão do crescimento populacional, do mau uso, da poluição e das mudanças climáticas. Por estas razões, há cada vez mais esforços para lidar com a escassez de água em diversas nações pelo mundo, como fica evidenciado pela Declaração Ministerial do 2º Fórum Mundial da Água e ratificado na Conferência das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento Sustentável (Rio+20) (Zhang et al., 2012). Dentre as soluções possíveis para o estresse hídrico podemos destacar o aumento na eficiência da utilização, o armazenamento e a dessalinização de água salobra subterrânea ou do mar. Na prática, as três devem ser aplicadas em conjunto para lidar com a crise hídrica vigente.

A dessalinização de água já é aplicada em diferentes escalas em cerca de 150 países. Dentre eles, se destacam os do Oriente Médio que são responsáveis por 45% do volume de água produzida no planeta. Uma usina instalada em Fernando de Noronha e com capacidade de produzir 650 m³/dia de água é a única de porte médio presente no Brasil. Porém, com o advento do Programa Água Doce (PAD), desde 2011, foram mapeadas comunidades com escassez de água em estados

do Nordeste brasileiro, compreendendo 291 municípios daquela região (MMA, 2022). A implementação de 1357 sistemas de dessalinização já está avançada no semiárido brasileiro, sendo a tecnologia escolhida a da osmose inversa (RO, na sigla em inglês), requerendo altas pressões e disponibilidade abundante e confiável de energia elétrica. Contudo, como evidenciado pela recente crise hídrica enfrentada pelo Sudeste brasileiro (Marengo & Alves, 2015), pode-se argumentar que os benefícios do desenvolvimento do programa podem se estender para uma fração ainda maior da população brasileira.

O reaproveitamento da energia térmica rejeitada por diferentes processos vem atraindo cada vez mais interesse, com o desenvolvimento de tecnologias para torná-lo mais eficiente sendo propostas sobretudo nos últimos trinta anos. Calor rejeitado a altas temperaturas já é efetivamente recuperado na própria planta, em virtude da quantidade significativa de valor econômico ainda passível de ser extraído dele; o mesmo não acontece com o calor residual de baixo conteúdo exergético que frequentemente termina sendo despejado no ambiente sem ser reprocessado (Fang et al., 2015). O motivo principal é a necessidade de trabalhar com baixas diferenças de temperatura, requerendo trocadores de calor com preços proibitivos para os possíveis ganhos econômicos do reaproveitamento de uma fonte de calor já severamente esgotada de sua capacidade de ser convertida em trabalho. Este panorama tem se alterado nas últimas décadas, em razão do avanço das mudanças climáticas e de regulações que foram impostas após a assinatura do Protocolo de Kyoto em 1997, e alternativas para aproveitar o calor residual em processos secundários têm sido investigadas (Ammar et al., 2015). Diversos processos secundários foram propostos para converter o calor residual em propósitos úteis, dentre os quais pode-se citar a geração de energia elétrica por ciclo Rankine orgânico, a refrigeração por ciclos de absorção e a dessalinização (Ammar et al., 2015), sendo esta última o tema principal do presente trabalho.

Uma das fontes de calor mais promissoras para aplicações de dessalinização no contexto atual é a solar; sobretudo no caso do Brasil, país que recebe a maior quantidade absoluta de irradiação solar no mundo. Uma das possibilidades é usar a energia absorvida por coletores solares e aproveitá-la em processos térmicos de dessalinização de água, como apontam alguns estudos (Mericq et al., 2011; Khayet, 2013; Duong et al., 2017). Alternativamente, pode-se aproveitar o calor residual absorvido por sistemas ativos de arrefecimento de painéis fotovoltaicos de alta concentração (HCPV, na sigla em inglês) necessários para evitar a degradação da eficiência de células multijunção, fornecendo-o para a água salobra e, em seguida, destilando-a em um equipamento de dessalinização (Zimmermann et al., 2015).

Nas usinas operacionais predomina a osmose inversa (RO), representando 60% da capacidade instalada, com algumas aplicações de processos de destilação multi-efeito (MED) e flash multi-estágios (MSF), sobretudo em países do oriente médio ricos em combustíveis fósseis (Ghaffour et al., 2013). Para superar as desvantagens destes três processos, uma série de tecnologias alternativas têm sido propostas desde os anos 1960, como a osmose direta (FO) (Chung et al., 2015), a eletrodialise (ED) (Porada et al., 2018) e a destilação por membranas (MD) (Drioli et al., 2015). Esta última tem como principais vantagens a capacidade de lidar eficientemente com fontes térmicas de baixo conteúdo exergético, menores tensões no módulo impostas pelas pressões de operação menores, reduzida incrustação nas membranas, capacidade de lidar com correntes de alta salinidade e a produção de água destilada, permitindo melhor qualidade da água produzida (Deshmukh et al., 2018). Como consequência, MD já é o processo ideal para emprego em comunidades remotas com dificuldades logísticas e com fornecimento pouco confiável de energia elétrica (Deshmukh et al., 2018). A força motriz do processo de destilação por membranas é a diferença de pressão de vapor ao contrapor duas superfícies livres de líquido a temperaturas diferentes, tendo como intermediário um gás, como o ar; o vapor, então, tende a fluir da superfície livre mais quente para a mais fria. Na prática, isto é alcançado com o uso de uma membrana hidrofóbica em cujos poros a água, que não consegue invadi-lo por completo, forma um menisco. Diversas configurações de MD foram propostas, sendo a destilação por membranas com vão de ar (AGMD) aquela em que um vão contendo ar úmido separa uma parede fria o suficiente para a condensação do vapor d'água da membrana, estando esta em contato direto com a corrente salobra quente (Drioli et al., 2015; Deshmukh et al., 2018; Shahu & Thombre, 2019; Eykens et al., 2017).

A energia livre de Gibbs para executar a separação do sal das moléculas de água ($1,06 \text{ kWh/m}^3$) que governa o dispêndio energético de técnicas como a osmose inversa e a eletrodialise, é consideravelmente menor do que o calor latente de vaporização da água (667 kWh/m^3), que está intimamente ligado à energia necessária para efetuar a destilação em processos como a destilação multi-efeito ou por membranas (Deshmukh et al., 2018). Em que pese o menor conteúdo exergético do calor em comparação com o trabalho empregado em RO e ED, esta diferença explica em grande parte a dominância do mercado pela osmose inversa (Ghaffour et al., 2013). No caso específico de MD, o uso de recuperação de calor diminui consideravelmente o dispêndio energético a valores bem abaixo do calor latente de vaporização (Deshmukh et al., 2018; Kiefer et al., 2018; Lisboa et al., 2021); de fato, o estado da arte em termos de eficiência energética, necessita de cerca de 56 kWh por m^3 de água produzido. Todos estes avanços, tornaram MD a tecnologia mais viável para plantas de baixo volume, isto é, com produção diária de água destilada de até 1000 m^3 , principalmente para áreas economicamente desfavorecidas (Deshmukh et al., 2018). Entretanto, em plantas de maior porte, o uso de MD ainda é questionável, mesmo em relação a outras técnicas de destilação como MED e MSF.

Neste contexto de eficiência energética, a configuração AGMD é uma das que se mostram mais promissoras por o ar úmido do vão dificultar a perda parasita por condução de calor através da membrana sem que essa energia seja efetivamente utilizada para vaporizar a água que migraria até o permeado. Ademais, ao resfriar a parede responsável por induzir a condensação do vapor d'água diluído no ar do vão com a própria água da saída do canal de alimentação após o devido arrefecimento, recuperando o calor latente e pré-aquecendo a corrente a ser realimentada no canal de água salobra

quente, diminuindo, assim, o calor proveniente de fontes externas. Como consequência, além do ganho de eficiência térmica, os custos de instalação se tornam menores sem a necessidade da introdução de um trocador externo para executar a recuperação de calor (Duong et al., 2016).

A multiplicidade de fenômenos envolvidos dificulta a correta modelagem e o projeto de sistemas AGMD (Summers & Arafat, 2012; Hitsov et al., 2017), possivelmente levando a uma indefinição sobre qual o impacto sobre a produtividade de água da adoção de AGMD em comparação com outras configurações de destilação por membranas (Shahu & Thombre, 2019). Experimentos em bancada tipicamente apontam para uma produtividade bem menor em comparação com a destilação por membranas com contato direto (DCMD), enquanto experimentos em plantas piloto de pequeno porte indicam que o contrário é verdadeiro (Eykens et al., 2017).

A presente pesquisa é centrada no projeto de um experimento versátil o suficiente para avaliar o impacto de cada mecanismo de transferência de calor no desempenho de sistemas de dessalinização por AGMD, bem como de testar diferentes geometrias e disposições de membrana e módulo. Para atingir estes objetivos, um módulo de dessalinização, fabricado por impressão 3D em prol da flexibilidade geométrica, é projetado para a instalação em um experimento de bancada. Ao seu redor, serão posicionados um circuito hidráulico devidamente instrumentado e equipado para garantir um fornecimento contínuo de água salobra e efetivar a recuperação de calor latente sem a necessidade de empregar equipamentos externos somente para este fim.

2. PROJETO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental proposta irá operar entre as temperaturas de 35°C e 80°C, numa faixa de salinidade de 0 a 35g/kg e uma vazão máxima de 5L/min. A Figura 1 apresenta o esquema do experimento aqui proposto para testes de módulos de dessalinização por membranas com vão de ar (AGMD), onde os símbolos usados para indicar os instrumentos são esclarecidos na legenda. Em posição de destaque, está o módulo de dessalinização por AGMD. Inicialmente, a configuração de membrana plana é empregada, embora se espere poder facilmente adotar outras geometrias no futuro. O canal de alimentação por onde passará a água salobra quente é formado pelo módulo e pela membrana hidrofóbica. Do outro lado da membrana, um compartimento de ar úmido é formado a partir de um espaçador. Uma parede metálica separa o condensado e uma corrente mais fria de água salobra, ajudando assim o arrefecimento e indução da condensação da umidade na corrente central. Na parte de baixo do compartimento, um dreno retira o permeado, cuja quantidade é medida com uma balança de precisão. Um condutivímetro é mergulhado no recipiente de coleta de destilado para assegurar que a integridade da membrana não foi comprometida e que nenhum sal a atravessou. Um termo-higrômetro e um transdutor de pressão serão empregados para aferir pressão, umidade e temperatura do vão de ar.

Por sua vez, a parede metálica e o módulo formam o canal de água de arrefecimento; no esquema de Figura 1, a própria água de alimentação, após resfriamento, é usada para arrefecer o ar úmido antes de ser reaquecida pelo circuito de aquecimento, dando ao experimento a capacidade de recuperação intrínseca de calor sem o uso de um trocador de calor específico para este fim.

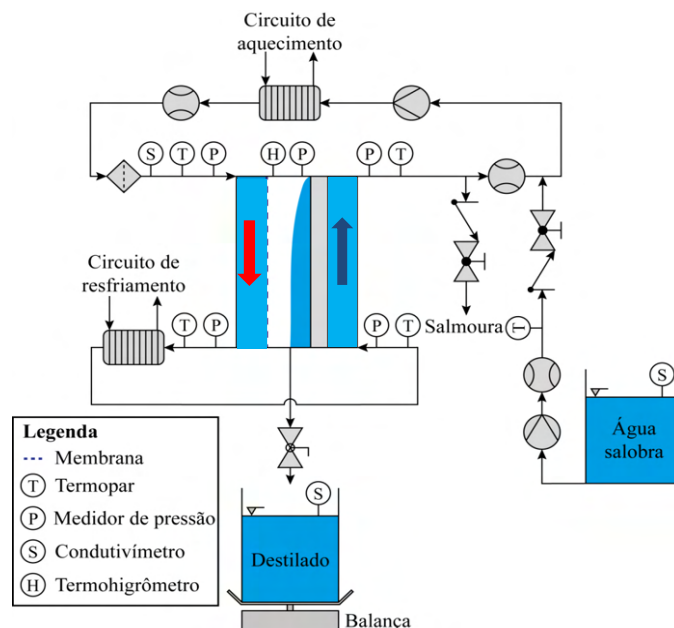


Figura 1. Esquema do experimento de bancada para testes de módulos de dessalinização por membranas com vão de ar (AGMD). Desenhos não estão em escala. Símbolos usados para indicar os instrumentos são esclarecidos na legenda.

A corrente principal de água salobra escoa em um circuito em loop, com derivações conectando-o aos tanques de água salobra e de salmoura (não mostrado na Figura 1). A intenção de tais derivações é permitir o controle da salinidade da corrente principal e, para um ajuste fino, cada uma conta com uma válvula de regulação, bem como uma de retenção, para evitar a reversão do escoamento, enquanto a salinidade é medida por uma célula de condutividade posicionada no duto de entrada do canal de alimentação. Com vistas à flexibilidade, mangueiras compostas de polímeros e elastômeros serão empregadas em vez de tubulação rígida, evitando também problemas de corrosão que ocorreriam caso dutos metálicos fossem utilizados. O projeto detalhado do circuito hidráulico é conduzido com procedimentos padrão para o cálculo de perdas de carga e dos princípios de conservação de espécies, quantidade de movimento e energia (White, 2007; Moran & Shapiro, 2006). As propriedades termofísicas necessárias serão obtidas de dados da literatura (Sharqawy, 2010). A especificação de acessórios segue as recomendações para lidar com o meio corrosivo que é a água salobra (Silva Telles, 2001).

Para aquecer a corrente de entrada e posteriormente arrefecer a de saída, trocadores de placas engaxetadas são especificados. Nos trocadores o calor é fornecido ou retirado por circuitos secundários conectados com banhos termostáticos de circulação, não mostrados no desenho da Figura 1. Medidas de temperatura e pressão serão tomadas nas entradas e saídas do módulo para subsidiar a análise de perdas de carga e do balanço de energia do sistema.

No total, quatro parâmetros geométricos são variados e seus efeitos na produtividade de destilado são monitorados, sendo cada um deles diretamente relacionado a um dos mecanismos de transporte envolvidos. São esses a largura do canal de água salobra, a largura do compartimento contendo a mistura ar-vapor, a espessura da placa metálica e a largura do canal da água de resfriamento. A possibilidade de controlar a pressão no compartimento contendo ar e vapor também será estudada, formando cinco parâmetros. Para minimizar a quantidade de experimentos a serem realizados, a técnica de projeto experimental 2ⁿ será empregada (Devore et al., 2014), em que testes são realizados variando os parâmetros entre dois níveis diferentes: superior e inferior. Cada teste deverá ser repetido ao menos três vezes para assegurar a repetibilidade. Dessa forma, um mínimo de 48 e um máximo de 96 experimentos são previstos no escopo desta etapa do projeto. De posse dos resultados, então, os efeitos de cada parâmetro são calculados (Devore et al., 2014) e colocados em um diagrama de Pareto para comparação e identificação dos principais fatores a influenciar um melhor desempenho do sistema de dessalinização.

Para a comparação com os resultados da modelagem conduzida pelo grupo de pesquisa em paralelo a este trabalho, dois módulos de AGMD com dimensões diferentes serão testados variando a temperatura da alimentação entre 40 °C e 60 °C, enquanto a temperatura da água de resfriamento é mantida em 25 °C. Medições serão feitas com incrementos de 5°C na temperatura da água de alimentação. Cada experimento será repetido 3 vezes para garantir repetibilidade, totalizando, portanto, 30 experimentos nesta etapa. Uma análise de incertezas (Moffat, 1988) será, então, utilizada para reportar os resultados experimentais e assegurar que os resultados do modelo são suficientemente acurados, com desvios da ordem da margem de erro experimental.

3. FABRICAÇÃO E MONTAGEM EXPERIMENTAL

Na Figura 2 abaixo é apresentado um desenho esquemático detalhando a bancada experimental que está sendo montada no contexto do presente projeto, onde pode-se ver: (a1) rotâmetro Omega Engineering FL-10J, sem válvula, faixa 0 a 5 L/min, (a2) rotâmetro Omega Engineering FL-3092SA, com válvula, faixa 0 a 36,74 mL/min, (b1) reservatório de água salina, (b2) reservatório de salmoura, (c) trocadores de calor, (d) bomba peristáltica Tecnopeon, modelo LDP-302-4, 2 canais, faixa 0 a 5 L/min, (e) módulo de dessalinização, (f) transmissor de condutividade.

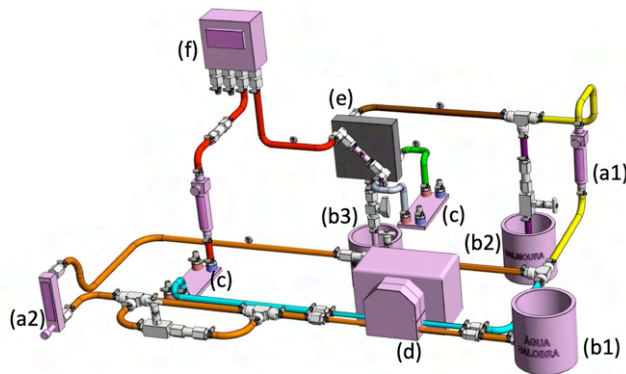


Figura 2. Desenho esquemático detalhando os componentes da bancada experimental

Para a montagem da referida bancada, foram adquiridos os perfis metálicos (Famak) para fixação do módulo AGMD que foi fabricado no contexto do presente projeto e de outros equipamentos como: a bomba peristáltica (Figura 3a), transdutores de pressão diferencial e de vazão, um Arduino Mega 2560 que será utilizado na aquisição dos dados, e as membranas hidrofóbicas (Figura 3b) que poderão ser trocadas de tempo em tempo durante a realização do experimento.

Desse modo, facilitará a manutenção da unidade, visto que não será necessário limpar as membranas, apenas troca-las quando necessário.

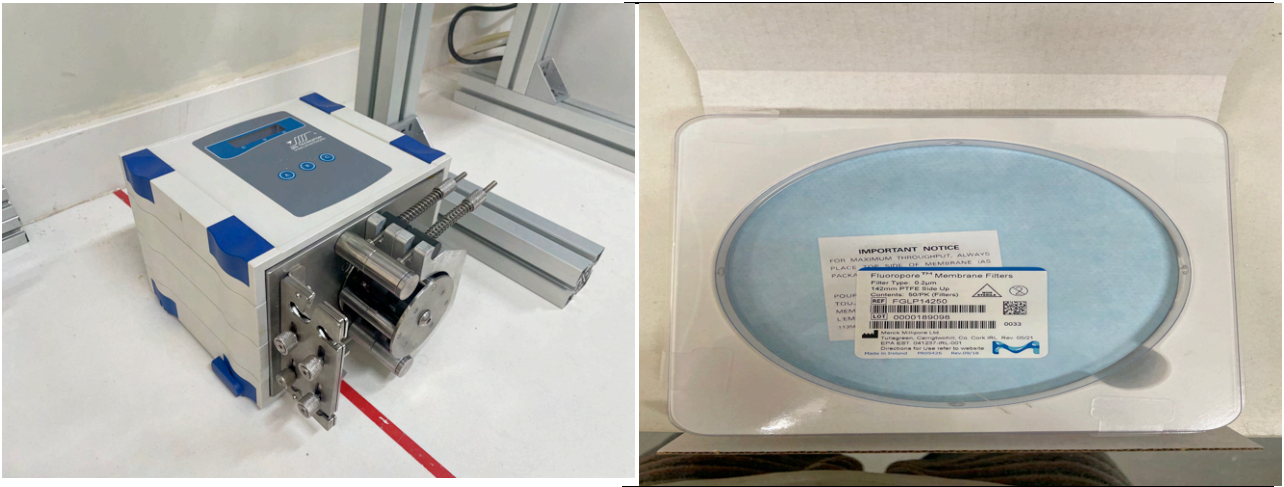


Figura 3. Exemplo de equipamentos e consumíveis usados na montagem da bancada experimental
a) bomba peristáltica; b) membranas hidrofóbicas

Com a ajuda de uma impressora 3D Creality Pro H (Figura 4) foram impressos os suportes em PLA que serão utilizados para fixar dois rotômetros (medidores de vazão) na lateral da estrutura principal que sustenta o módulo de dessalinização.

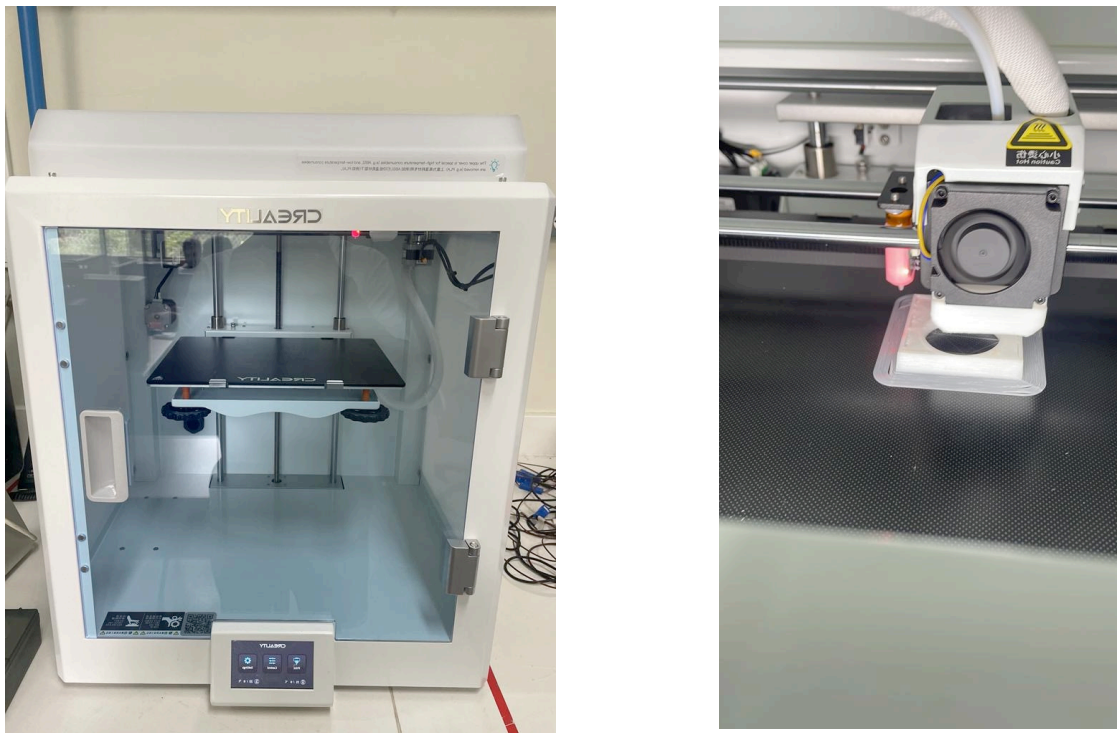


Figura 4. Impressora 3D (Creality Pro H) empregada na fabricação de componentes do experimento

Abaixo podemos ver, nas Figuras 5, os suportes e o rotômetro fixados no perfil metálico. Além dos suportes para o rotômetro, foram também fabricadas via impressão 3D duas mãos francesas, usadas na fixação do módulo AGMD na estrutura.

O módulo AGMD foi projetado e sua impressão em PLA foi iniciada. No entanto, optou-se por imprimi-lo em ABS, por ser um polímero que resiste a temperaturas mais elevadas. Os desenhos esquemáticos das estruturas são apresentados

na Figuras 6 abaixo. Na Fig. 6, tem-se o canal e a parede do módulo, o suporte da membrana, o espaçador que cria o vão de ar, e os espigões, partes que a qualquer momento poderão ser desmontadas para a manutenção e troca das membranas.



Figura 5a. Suportes fabricados via impressão 3D



5b. Rotâmetro fixado na estrutura com os suportes, item (a1) na Fig.2

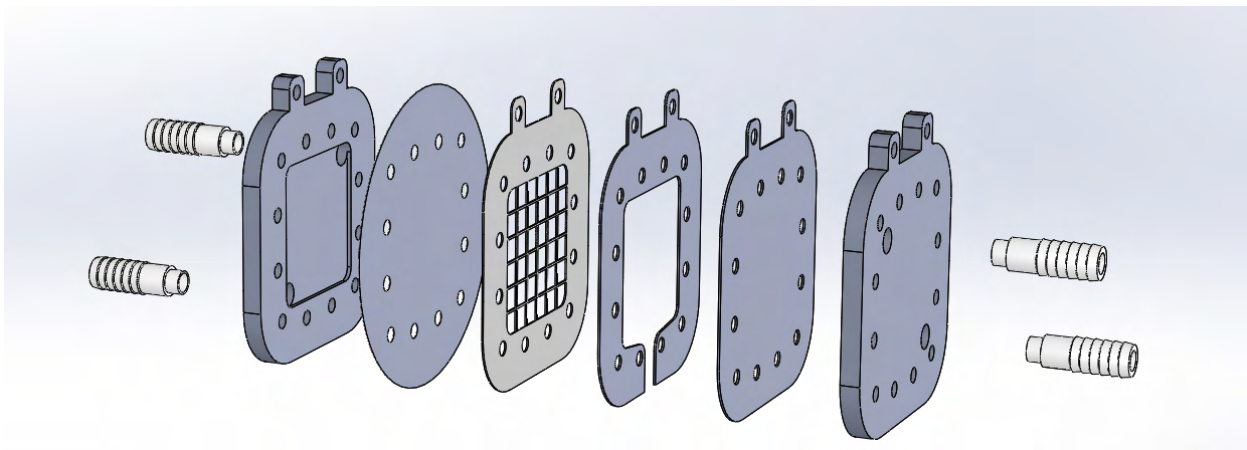


Figura 6. Desenhos esquemáticos das partes do módulo AGMD que foram fabricados via impressão 3D

Com isso, pôde-se iniciar a montagem da bancada experimental, onde todos os equipamentos adquiridos foram instalados como pode ser visto na Figura 7. Tem-se a estrutura metálica com ambos os rotômetros instalados nas laterais e à direita o banho termostático Julabo Corio CD- 200F, que será responsável pelo aquecimento da corrente de água salina e, em marrom, parte do módulo AGMD em PLA fixado com as mãos francesas, para testar essa fixação.



Figura 7. Estágio atual da montagem da bancada experimental

4. CONCLUSÕES

A pesquisa apresentada objetiva primeiramente o dimensionamento dos equipamentos e dutos, bem como a seleção de instrumentos e plataformas de aquisição de dados para um experimento em bancada de destilação por membranas com vão de ar (AGMD). Neste processo, foram levados em consideração perdas de carga, ação corrosiva da água salobra, variação e ajuste da salinidade da água, adequação para módulos de dessalinização de variados tamanhos, e acesso para as sondas.

Para evitar os problemas de corrosão inerentes da manipulação de água de alta salinidade, optou-se por trabalhar com mangueiras de silicone. A bomba escolhida foi uma peristáltica modelo LDP-302-4, da marca tal Tecnopon, que oferece uma solução flexível para diferentes processos incluindo a manipulação de águas de alta salinidade uma vez que o fluido não toca nenhuma parte da bomba, exceto a superfície interna da mangueira.

Finalmente, segue-se a montagem e ajuste do experimento com o propósito de estabelecer quais são os fatores preponderantes na produtividade de destilado de sistemas AGMD e, também, de validação do modelo simples, que está sendo desenvolvido em paralelo, para os diversos fenômenos de transporte envolvidos.

5. REFERÊNCIAS

- Ammar, Y., S. Joyce, R. Norman, Y. Wang, and A.P. Roskilly, 2012. "Low Grade Thermal Energy Sources and Uses from the Process Industry in the UK", *Applied Energy*, Vol. 89, pp.3-20.
- Bejan, A., 1996. *Entropy Generation Minimization: The Method of Thermodynamic Optimization of Finite-Size Systems and Finite-Time Processes*, CRC Press, Boca Raton, FL.
- Chung, T.S., Luo, L., Wan, C.F., Cui, Y., Amy, G., 2015. "What is next for forward osmosis (FO) and pressure retarded osmosis (PRO)", *Separation and Purification Technology*, Vol. 156, pp. 856-860.
- Deshmukh, A., Boo, C., Karanikola, V., Lin, S., Straub, A.P., Tong, T., Warsinger, D.M., Elimelech, M., 2018. "Membrane distillation at the water-energy nexus: limits, opportunities, and challenges", *Energ. & Environ. Sci.*, Vol. 11, pp.1177-1196.
- Devore, J., Farnum, N., Doi, J., 2014. *Applied Statistics for Engineers and Scientists*. Cengage, Stamford, CT.
- Drioli, E., Ali, A., Macedonio, F., 2015. "Membrane distillation: Recent developments and perspectives", *Desalination*, Vol. 356, pp. 56-84.
- Duong, H.C., Cooper, P., Nelemans, B., Cath, T.Y., Nghiem, L.D., 2016. "Evaluating energy consumption of air gap membrane distillation for seawater desalination at pilot scale level", *Separation and Purification Technology*, Vol. 166, pp. 55-62.
- Duong, H.C., Xia, L., Ma, Z., Cooper, P., Ela, W. Nghiem, L.D., 2017. "Assessing the performance of solar thermal driven membrane distillation for seawater desalination by computer simulation", *J. Membr. Sci.*, Vol. 542, pp.133-142.
- Eykens, L., Hitsov, I., De Sitter, K., Dotremont, C., Pinoy, L., Van der Bruggen, B., 2017. "Direct contact and air gap membrane distillation: Differences and similarities between lab and pilot scale", *Desalination*, Vol. 422, pp. 91-100.
- Fang, H., Xia, J., Jiang, Y., 2015. "Key issues and solutions in a district heating system using low-grade industrial waste heat", *Energy*, V. 86, pp. 589-602.
- Ghaffour, N., Missimer, T.M., Amy, G.L., 2013. "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability", *Desalination*, Vol. 309, pp.197-207.
- Hitsov, I., De Sitter, K., Dotremont, C., Cauwenberg, P., Nopens, I., 2017. "Full-scale validated Air Gap Membrane Distillation (AGMD) model without calibration parameters", *Journal of Membrane Science*, Vol. 533, pp. 309-320.
- Khayet, M., 2013. "Solar desalination by membrane distillation: Dispersion in energy consumption analysis and water production costs", *Desalination*, Vol. 308, pp.89-101.
- Kiefer, F., Spinnler, M., Sattelmayer, T., 2018. "Multi-Effect Vacuum Membrane Distillation systems: Model derivation and calibration", *Desalination*, Vol. 438, pp.97-111.
- Lisboa, K.M., Moraes, D.B., Naveira-Cotta, C.P., Cotta, R.M., 2021. "Analysis of the membrane effects on the energy efficiency of water desalination in a direct contact membrane distillation (DCMD) system with heat recovery", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 182, pp. 116063.
- Marengo, J.A., Alves, L.M., 2015. "Crise hídrica em São Paulo em 2014: Seca e desmatamento", *GEOUSP Espaço e Tempo*, Vol. 19, pp. 485-494.
- Mericq, J., Laborie, S., Cabassaud, C., 2011. "Evaluation of systems coupling vacuum membrane distillation and solar energy for seawater desalination", *Chem. Eng. J.*, Vol. 166, pp.596-606.
- MMA, <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/seguranca-hidrica/programa-agua-doce>, 2022.

- Moffat, R.J., 1988. “Describing the uncertainties in experimental results”, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 1, pp. 3-17.
- Moran, M.J., Shapiro, H.N., 2006. *Fundamentals of Engineering Thermodynamics*, 5th ed., John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Porada, S., Van Egmond, W.J., Post, J.W., Saakes, M., Hamelers, H.V.M., 2018. “Tailoring ion exchange membranes to enable low osmotic water transport and energy efficient electro dialysis”, *Journal of Membrane Science*, Vol. 552, pp. 22-30.
- Shahu, V.T., Thombre, 2019. “Air gap membrane distillation: A review”, *J. Renewable Sustainable Energy*, Vol. 11, pp. 045901.
- Sharqawy, M.H., Lienhard, J.H., Zubair, S.M., 2010. “Thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data”, *Desalination Water Treat.*, Vol. 16, pp. 354-380.
- Silva Telles, P.C., 2001. *Tubulações Industriais: Materiais, Projeto, Montagem*, 10ª ed., LTC, Rio de Janeiro, Brazil.
- Summers, E.K., Arafat, H.A., 2012. “Energy efficiency comparison of single-stage membrane distillation (MD) desalination cycles in different configurations”, *Desalination*, Vol. 290, pp. 54-66.
- White, F.M., 2007. *Fluid Mechanics*, 6th ed, McGraw-Hill, New York, NY.
- Zhang, G.P., A.Y. Hoekstra, D. Tickner, 2012. “Proceedings of the Session - Solving the Water Crisis: Common Action toward a Sustainable Water Footprint”, Research Report Series No. 60, *Conference on Sustainable Development: Planet under Pressure*, March 26-29, London.
- Zimmermann, S., Helmers, H., Tiwari, M.K., Paredes, S., Michel, B., Wiesenfarth, M., Bett, A.W., Poulidakos, D., 2015. “A high-efficiency hybrid high-concentration photovoltaic system”, *Int. J. Heat Mass Transf.*, Vol. 89, pp.514-521.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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