

DESSALINIZAÇÃO VIA DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS A PARTIR DE CALOR RESIDUAL DE MOTORES DE PROPULSÃO OU GERAÇÃO

Desalination via membrane distillation using waste heat from propulsion or generation engines

Priscila Simões Teixeira Amaral¹ , Cristiane Raquel Sousa Mesquita² , Gabriel Neri de Souza³ , Vinicius Ferreira Monteiro⁴ , Abdul Orlando Cárdenas Gomez⁵ , Carolina Palma Naveira Cotta⁶ 

Resumo: O presente trabalho descreveu desenvolvimentos em dessalinização via destilação por membranas (MD), a partir de calor rejeitado de motores de combustão interna para propulsão e/ou geração diesel-elétrica em meios navais. A tecnologia propõe-se a garantir e estender os limites operacionais e aumentar a eficiência energética dos meios navais em missão. Primeiramente, são reportados experimentos de dessalinização em bancada de laboratório com membranas comerciais, na configuração de destilação por membranas em contato direto (DCMD), demonstrando a viabilidade de se destilar em concentrações superiores às da água do mar sem penalizar a qualidade de água produzida, com coeficientes de rejeição de sais superiores a 99,96%. A seguir, foi projetado e construído um protótipo de dessalinizador por MD, empregando um aquecedor industrial como fonte térmica para emular o calor recuperado de máquinas térmicas com capacidade para fornecer até 11 kW de calor. Na unidade piloto de demonstração instalada no IPqM foram obtidos fluxos de destilado entre 1,5 e 3,5 kg/m²h. Os resultados experimentais no protótipo validaram o modelo teórico proposto para dimensionamento de novos sistemas. Os resultados experimentais do fluxo de destilado e as temperaturas de saída no módulo de membranas apresentaram boa concordância de $\pm 10\%$ com os

Abstract: The present work described developments in desalination via membrane distillation (MD), using rejected heat from internal combustion engines for propulsion and/or diesel-electric generation in naval platforms. The technology proposes to guarantee and extend operational limits and increase the energy efficiency of naval assets on mission. Firstly, desalination experiments are reported on a laboratory bench with commercial membranes, in direct contact membrane distillation (DCMD) configuration, demonstrating the viability of distillation in concentrations higher than those of seawater without penalizing the quality of water produced, with salts rejection coefficients greater than 99.96%. Next, an MD desalination prototype was designed and built using an industrial heater with the capacity to provide up to 11 kW of heat as the thermal source to emulate the heat recovered from thermal engines. In the pilot demonstration unit installed at IPqM, distillate flows of between 1.5 and 3.5 kg/m² h were obtained. The experimental results in the prototype validated the theoretical model proposed for sizing new systems. The distillate flow and the outlet temperatures in the membrane module obtained experimentally showed a good agreement of $\pm 10\%$ with the results from the mathematical model. Finally, the design of the pilot unit

1. Capitão de Corveta (EN), Encarregada do Grupo de Tecnologia de Materiais, Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM). Doutora em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: priscila.simo@marinha.mil.br
2. Pesquisadora no Laboratório de Nano e Microfluídica e Microsistemas (LabMEMs) na UFRJ. Doutoranda em Engenharia Mecânica pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: cristi.mesquita@gmail.com
3. Pesquisador no LabMEMs na UFRJ e no IPqM. Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: enggabrielns@gmail.com
4. Pesquisador no LabMEMs na UFRJ e no IPqM. Mestrando em Engenharia Mecânica pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: monteiro@poli.ufrj.br
5. Pesquisador no LabMEMs na UFRJ. Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG - Brasil. E-mail: orlandocardenas1589@gmail.com
6. Professora associada do Programa de Engenharia Mecânica do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE)/UFRJ, Coordenadora do LabMEMs na UFRJ. Doutora em Engenharia Mecânica pela COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: carolina@mecanica.coppe.ufrj.br

resultados obtidos do modelo matemático. Finalmente, foi descrito o projeto da unidade piloto para ambiente operacional, que faz a integração com o sistema de arrefecimento do motor de combustão.

Palavras-chave: Dessalinização. Destilação por membrana. Recuperação de calor. Eficiência energética. Cogeração.

1. INTRODUÇÃO

A recuperação de energia térmica em diferentes processos é um tema de interesse crescente, com investimentos significativos em tecnologias para aumento de eficiência energética nos últimos trinta anos, em particular para processos de alta exergia (*high-grade thermal energy*) (SLEITI; AL-AMMARI; AL-KHAWAJA, 2023). O calor residual produzido em diferentes processos industriais, geralmente calor rejeitado a partir de níveis médios de temperatura ($> 230\text{ }^{\circ}\text{C}$), é reutilizado na própria planta, enquanto o calor rejeitado a baixas temperaturas é dissipado para o meio ambiente, frequentemente sem reutilização. Foi reportado recentemente pelo Departamento de Energia dos EUA (THEKDI et al., 2021), que mais de 51% do calor residual a temperaturas baixas e ultrabaixas na indústria não é recuperado, e ainda, que o calor residual na faixa de temperatura de 48 a $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ representa aproximadamente 25% do calor residual total não recuperado (THEKDI et al., 2021). Assim, aplicar processos de cogeração que utilizem o calor nessa faixa de temperatura é uma oportunidade promissora para aumentar a eficiência energética global das plantas, reduzir a emissão de gases de efeito estufa e minimizar custos operacionais. Nesse cenário, diversas tecnologias foram desenvolvidas para recuperar o calor residual de baixa exergia (temperaturas baixas e ultrabaixas), sendo destinado para pré-aquecimento de outros processos complementares como acionar sistemas de resfriamento térmico (SLEITI; AL-AMMARI; AL-KHAWAJA, 2023), gerar eletricidade ou produzir água potável através de processos de dessalinização ou tratamento de água (XU et al., 2023).

Quanto ao desenvolvimento tecnológico na dessalinização de água, vale destacar que os processos de separação convencionalmente utilizados em dessalinização são processos térmicos, como a compressão térmica de vapor (*vapor compression* — VC), a destilação multiefeito (*multieffect distillation* — MED) e o flash de múltiplos estágios (*multistage flash* — MSF), e os processos de separação por membrana como a nanofiltração (*nanofiltration* — NF) e a osmose inversa

for operational environment is described, which integrates with the combustion engine cooling system.

Keywords: Desalination. Membrane distillation. Heat recovery. Energy efficiency. Cogeneration.

(*reverse osmose* — RO). No entanto, a destilação por membrana (*membrane distillation* — MD) é um processo considerado híbrido, pois combina os princípios de evaporação térmica e separação por membrana em uma única unidade de processo (GUDE, 2018). No processo de destilação por membranas, a força motriz que promove o transporte de vapor de água através de membranas microporosas e hidrofóbicas é o gradiente de pressão de vapor do fluido, o qual é dependente do gradiente de temperatura entre as superfícies da membrana em contato com a corrente de alimentação aquecida e a superfície fria na face oposta da membrana, que é a corrente fria de destilado na configuração de contato direto (*direct contact membrane distillation* — DCMD). Na dessalinização via destilação por membranas, combinam-se as vantagens dos processos térmicos (por exemplo, destilação), de promover a separação de componentes voláteis de uma mistura baseando-se no equilíbrio líquido-vapor, com os métodos de separação por membranas, que fazem uso da capacidade seletiva e de intermediação de membranas entre as correntes de alimentação e permeação que permitem apenas a passagem do componente de interesse através dos poros da membrana (LISBOA et al., 2021; ANJOS et al., 2022; CURCINO et al., 2022). Isso confere à MD uma vantagem em aplicações com recuperação de calor de baixa exergia, por exemplo derivado da energia solar em sistemas *high concentration photovoltaic system* (HCPV), *photovoltaic thermal hybrid solar collector* (PVT), coletores solares, ou de calor residual de diversos processos térmicos como o calor rejeitado nos sistemas de arrefecimento dos motores de combustão de propulsão ou de geração utilizados em meios navais, além de não apresentar uma demanda significativa de energia elétrica para a realização do processo de dessalinização, como no caso da osmose inversa (ELSAID et al., 2020).

Soluções tecnológicas na produção de água potável a partir da dessalinização devem ser abordadas em aplicações no Poder Naval, dado que em situações operacionais adversas, um dos desafios enfrentados é o provimento de condições de trabalho

adequadas para o bem-estar das tripulações. A questão de segurança operacional, tanto em submarinos quanto em meios de superfície, pode ser tratada a partir da utilização de recursos energéticos já disponíveis a bordo, como calor residual do sistema de propulsão ou geração das embarcações, ampliando a capacidade operacional e reduzindo seu custo. Nesse contexto, o presente documento apresenta uma análise sequencial de desenvolvimentos no processo de dessalinização via destilação por membranas, realizados em colaboração entre o Laboratório de Nano e Microfluídica e Microssistemas (LABMEMS), do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ), e o Grupo de Tecnologia de Materiais do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), com financiamento principalmente do Programa de Cooperação Acadêmica em Defesa Nacional (PROCAD-Defesa) da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ). Os mecanismos da transferência de calor e massa das membranas hidrofóbicas comerciais foram investigados a partir de experimentos em bancada laboratorial com ambiente controlado e módulos de destilação de geometria plana. A seguir, foi desenvolvido um modelo teórico de parâmetros concentrados para avaliar a eficiência energética e o desempenho do processo sob diferentes condições operacionais, a partir da sua validação com resultados experimentais dos módulos comerciais de unidades semelhantes àquelas utilizadas em ambientes relevantes e operacionais. Também é descrito um protótipo de dessalinização em ambiente relevante, projetado e construído

para integração a motores de combustão interna, visando implementar o processo de destilação por membranas a partir da recuperação de calor residual do sistema de arrefecimento da jaqueta do motor. Finalmente, apresentam-se os resultados de qualificação e de ensaios do protótipo, bem como o projeto da unidade piloto a ser instalada em ambiente operacional, que outorgarão aos meios navais maior autonomia e menor custo energético, uma vez que sua maior demanda energética é justamente o calor rejeitado para o meio ambiente pelos motores de geração ou de propulsão de navios ou de unidades táticas móveis de suporte a regiões insulares, regiões isoladas ou em situações de contingência ou catástrofe.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. UNIDADE LABORATORIAL DE AMBIENTE CONTROLADO

No contexto do projeto AquaVitae, foi projetada e construída uma bancada laboratorial de dessalinização no LABMEMS, COPPE/UFRJ, para caracterização de membranas comerciais e membranas modificadas superhidrofóbicas no processo de destilação por membrana na configuração DCMD. A Figura 1A mostra a fotografia da seção de testes da bancada experimental, que permite analisar o desempenho das membranas em condições de salinidade e temperaturas próximas às condições encontradas nos experimentos de dessalinização no protótipo em ambiente relevante a ser descrito. Nesse sentido, a faixa estabelecida para a temperatura de alimentação foi de 65–85°C

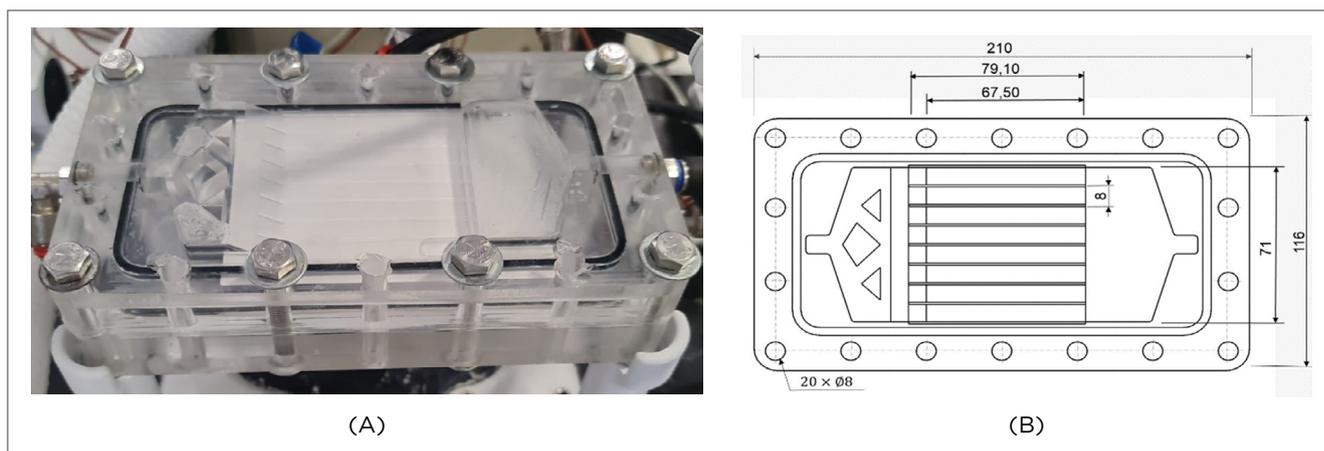


Figura 1. (A) Módulo DCMD utilizado no aparato experimental. (B) Desenho técnico dos canais do espaçador do módulo (dimensões em mm).

e a temperatura de permeado foi de 25–40°C. As faixas de vazão estabelecidas para alimentação e permeado, por sua vez, são determinadas pelo limite operacional das bombas disponíveis na bancada laboratorial (0,1 – 1,0 L/min). O módulo de destilação (DCMD) inclui ainda dois *o-rings* para vedar a membrana que é suportada por espaçadores. O espaçador atual é composto por conjuntos de canais retos em ambos os lados, de alimentação e permeado. A Figura 1B apresenta o detalhamento geométrico do espaçador atual, composto por 8 canais retos. Essa geometria proporciona uma distribuição mais uniforme do escoamento entre os canais.

2.2. PROTÓTIPO DO DESSALINIZADOR VIA DESTILAÇÃO POR MEMBRANAS

Para avaliar a tecnologia de dessalinização via MD, foi projetado e construído um protótipo para demonstração de escala no contexto do projeto Aqua Vitae (CÁRDENAS-GOMEZ et al., 2022), reaproveitando-se a estrutura mecânica de um dessalinizador originalmente montado pela empresa PAM Membranas. O comissionamento e operação do protótipo de dessalinizador instalado no Laboratório de Tecnologias em Energias Sustentáveis (LATES/IPqM) foi operado nessa fase com um módulo comercial de DCMD em espiral, da empresa Aquastil. O protótipo possui um trocador para recuperação de calor da corrente de destilado. A Figura 2 ilustra com (Figura 2a) foto e (Figura 2b) esquema termohidráulico, o protótipo

de destilação por membranas, onde se destacam em azul e vermelho, respectivamente, o módulo de dessalinização e o trocador de calor de recuperação de energia da corrente de permeado. O equipamento possui a instrumentação necessária (temperaturas, pressões, vazões e transmissores de condutividade elétrica) para a aquisição de dados e a caracterização experimental do processo de destilação. Pode-se destacar a possibilidade de realização do processo de destilação dentro de uma ampla faixa de temperaturas (30–80°C), que podem ser obtidas a partir do uso de diferentes fontes de calor, como o calor rejeitado de motores de combustão para geração de eletricidade nos meios navais. Dependendo das condições de processo e do calor disponível para o processo de destilação, os fluxos de destilado produzidos podem variar entre 1,5 e 5 L/m²h. O módulo possui área total de membrana de 7 m² e o comprimento de cada canal é de 2,7 m. Os canais de evaporação e condensação são separados por espaçadores de PP (polipropileno) com espessura de 2 mm, porosidade de 0,86 e ângulo de ataque de 68°. A membrana utilizada é constituída por PE (polietileno) com espessura igual a 0,1 µm, porosidade de 0,85 e diâmetro de poro médio igual a 0,32 µm.

Nessa etapa de comissionamento do dessalinizador, um aquecedor de água industrial foi empregado para simular as condições experimentais que serão encontradas na recuperação de calor do motor auxiliar de geração do navio. A unidade de dessalinização possui um sistema automatizado de descarga

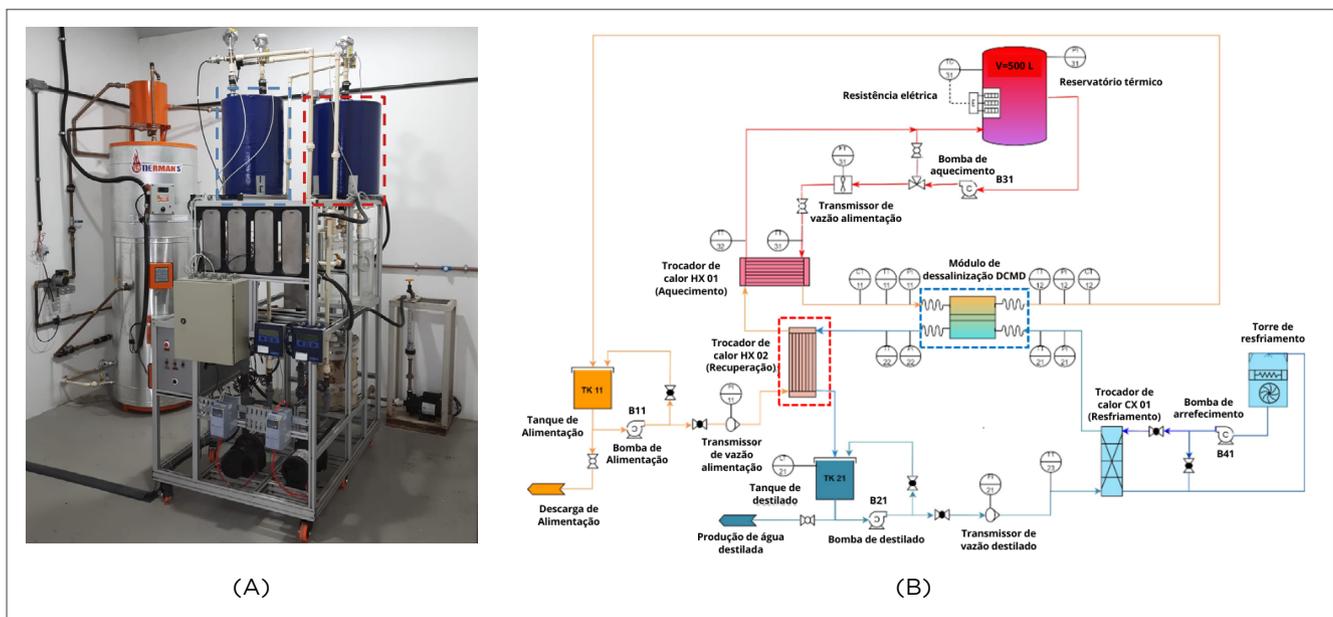


Figura 2. (A) Protótipo de dessalinizador do LATES/IPqM e (B) Circuito termohidráulico do protótipo.

de fluido no tanque de coleta de destilado. A concentração salina na solução de alimentação é mantida em condições de concentração próximas às da água do mar (38 g/L) por meio do monitoramento da condutividade elétrica da solução de alimentação. A unidade piloto possui um módulo de aquisição de dados *5000965 Industrial Multichannel Data Logger FieldLogger* da NOVUS. O monitoramento, controle e armazenamento das variáveis do processo como temperatura, vazão, pressão, volume de água produzido e condutividade elétrica são realizados por um sistema de aquisição implementado no *software LabView* para pós-processamento das informações coletadas no experimento. As variáveis controladas do processo são as vazões de alimentação e de permeado, cuja faixa operacional varia de 0,3–0,9 m³/h para ambos os canais, a temperatura de alimentação (60–80°C) e a temperatura de retorno do permeado, que varia de 27–32°C.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, apresentam-se as análises realizadas na unidade laboratorial de dessalinização em ambiente controlado, avaliando-se o desempenho das membranas utilizadas no processo. Na segunda parte, apresentam-se os resultados de validação do modelo teórico com experimentos em diferentes salinidades e com resultados experimentais da unidade piloto instalada no LATES/IPqM.

3.1. BANCADA LABORATORIAL

A partir dos experimentos em bancada experimental em ambiente controlado, é possível otimizar condições operacionais para uma dada membrana, considerando-se um planejamento experimental que permita essa busca com um número mínimo de medidas. Também é importante o papel da bancada na comparação da performance de diferentes tipos de membranas comerciais de PE de baixa densidade fornecidas pela empresa Aquastill, mesma fornecedora dos módulos comerciais, cujas propriedades físicas se encontram detalhada no trabalho de Mesquita et al. (2022) e na caracterização de futuros tratamentos superficiais para aumento da hidrofobicidade. Análises teóricas foram também implementadas para incluir os efeitos de hidrofobicidade e avaliar diferentes modelos de propriedades efetivas das membranas, e os resultados experimentais da bancada foram essenciais para a validação do modelo. A qualificação do aparato experimental foi realizada através da verificação da obediência aos balanços de massa e energia no circuito, descrita pelas Figuras 3A e 3B, respectivamente. Os experimentos realizados na unidade laboratorial usando membrana comercial sob diferentes condições de concentração da solução de alimentação, mostraram que é possível conduzir processos de dessalinização em concentrações maiores à concentração do mar de 35 g/L de NaCl (Figura 4A), sem penalizar a qualidade da água destilada produzida, dado que para todos os experimentos conduzidos em ambiente controlado, o coeficiente

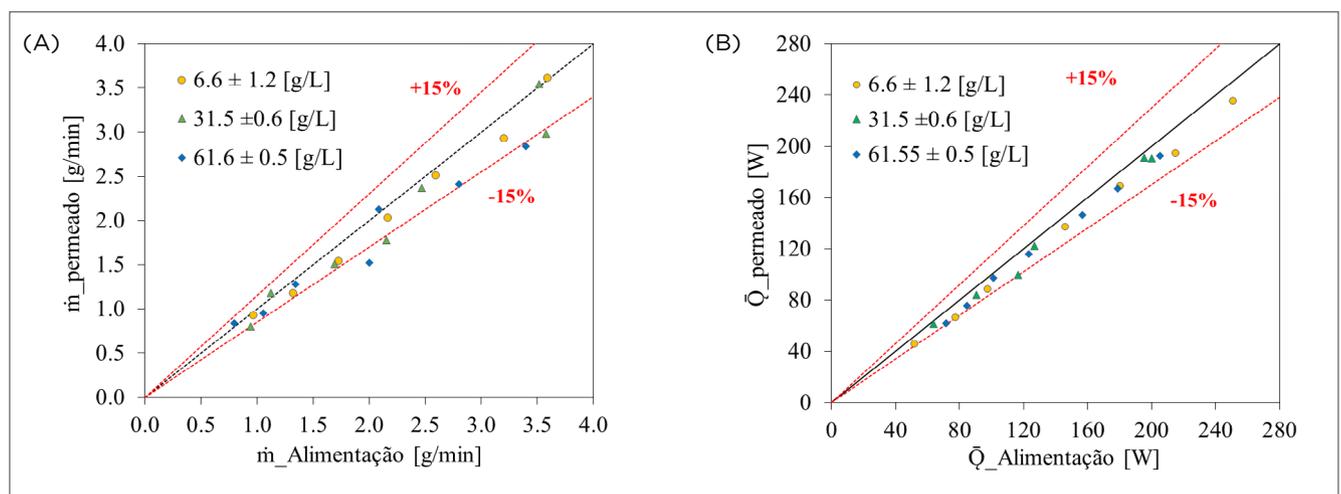


Figura 3. Qualificação da bancada laboratorial de dessalinização. (A) Conservação de massa. (B) Conservação de energia.

de rejeição de sal foi superior a 99,96% para todas as concentrações avaliadas (Figura 4B).

3.2. PROTÓTIPO

Após o comissionamento do protótipo instalado no LATES/IPqM, foram realizados experimentos de qualificação com o fluido de referência (água destilada). As condições experimentais foram estabelecidas conforme planejamento experimental 2^K com réplicas de ponto central. Os experimentos consideraram três parâmetros de entrada: vazão de alimentação, vazão de permeado e temperatura de entrada da alimentação, e uma variável de resposta (fluxo de

destilado). Assim, os três níveis de vazão de alimentação e permeado conforme planejamento experimental foram 700, 800 e 900 L/h, e a temperatura de entrada na alimentação foi mantida em 60, 65 e 70°C. Portanto, a primeira parte da validação foi baseada nos resultados dos balanços de energia no circuito experimental, conforme descrito a seguir: balanço de energia no módulo de destilação por membranas, mostrado na Figura 5A, que relaciona o calor transferido do fluido de alimentação para o fluido destilado e Balanço de energia no trocador calor para recuperação de calor latente do processo de separação conforme mostrado na Figura 5B. Nesse sentido, conforme esperado, os resultados da Figura 5 se mostraram

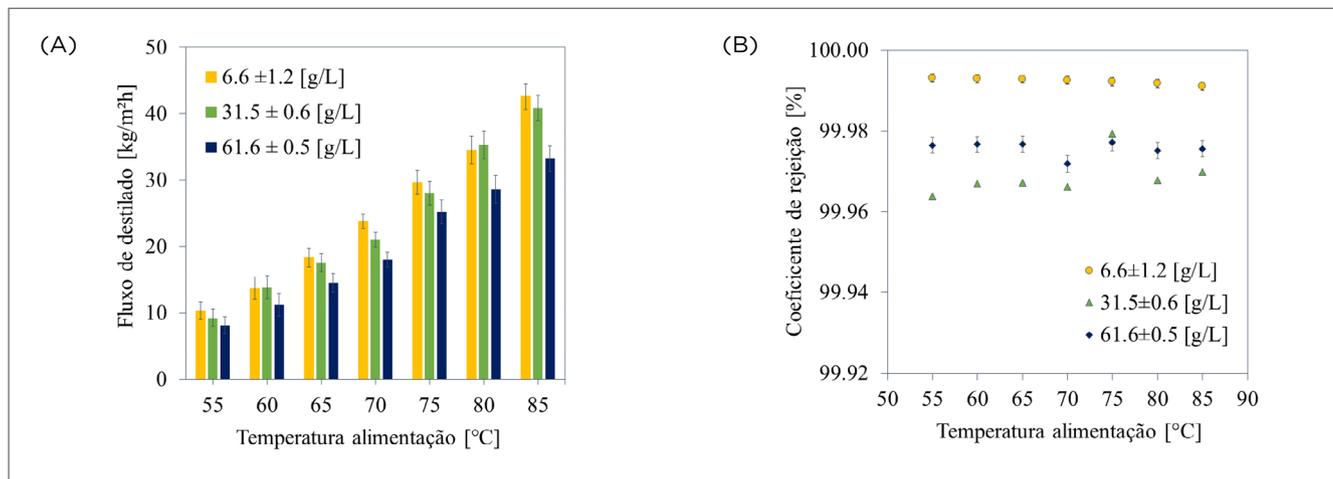


Figura 4. Resultados experimentais na bancada laboratorial com membrana comercial plana. (A) Fluxo de destilado (B) Coeficiente de rejeição salina na água produzida.

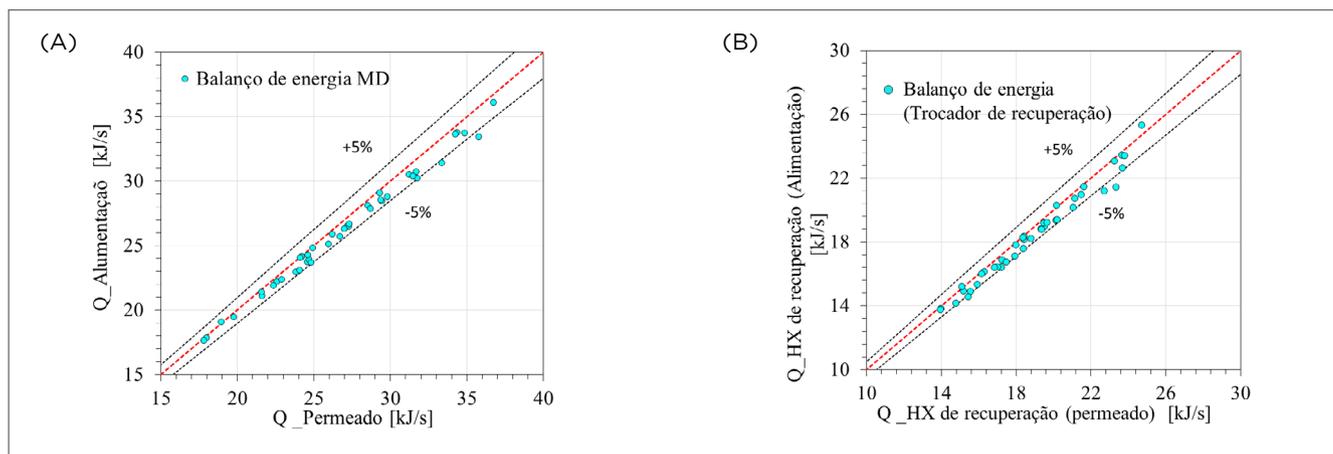


Figura 5. Balanços de energia do protótipo de dessalinizador do IPqM (A) no módulo de destilação por membranas, (B) no trocador de calor de recuperação.

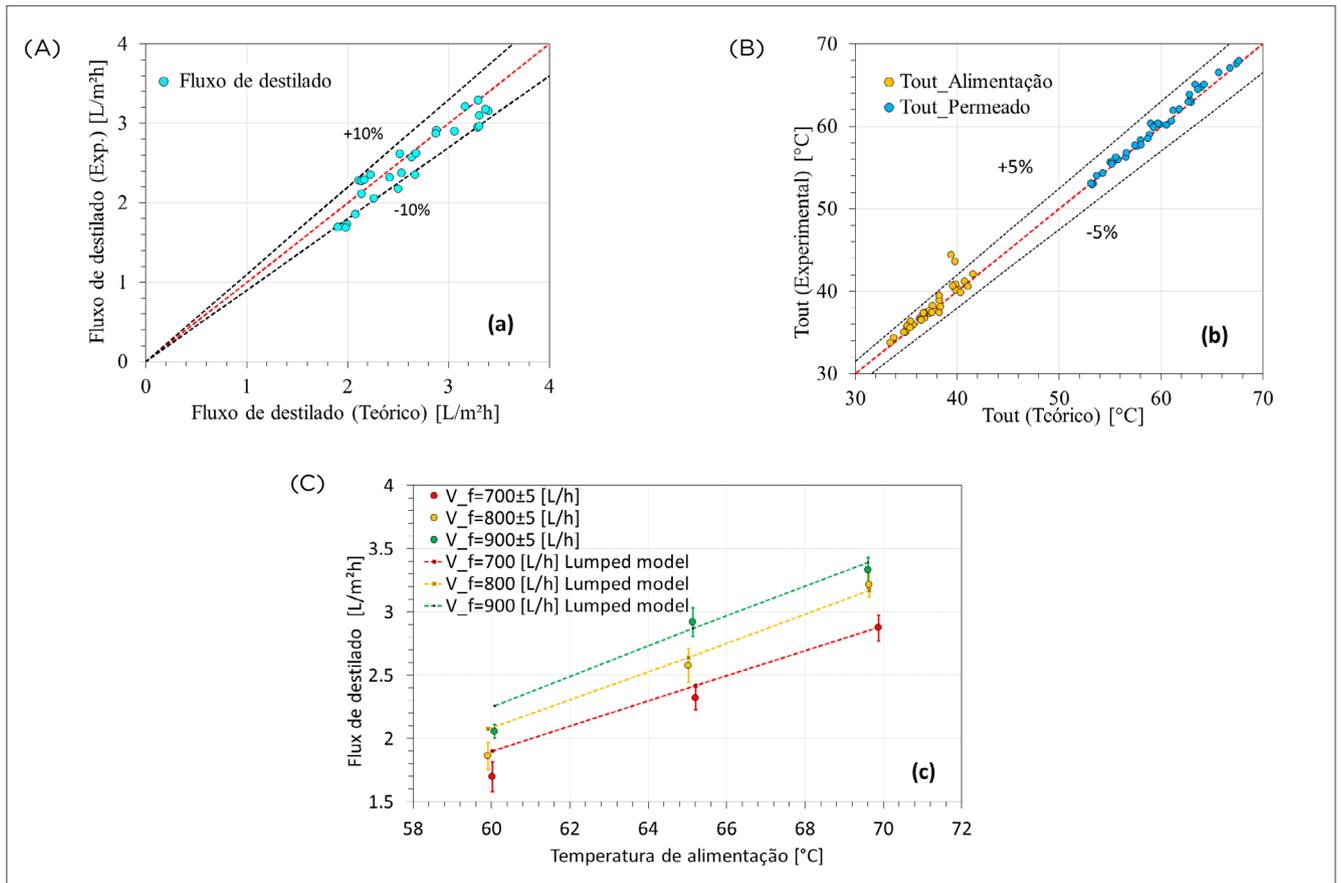


Figura 6. (A) Fluxo de destilado experimental e teórico (B) Temperaturas de saída, experimentais e teóricas (C) Fluxos de destilado experimentais e teóricos.

dentro de uma margem de $\pm 5\%$ de desvio, indicando que o princípio de conservação de energia é obedecido pelas medidas no aparato experimental construído.

Foi também realizada a comparação dos resultados experimentais do fluxo de destilado e das temperaturas de saída obtidos no protótipo com os resultados obtidos pelo modelo teórico posposto. A Figura 6A apresenta a comparação entre os fluxos de destilado, experimentais e teóricos, onde os desvios na maior parte das condições estão dentro de uma margem de $\pm 10\%$, indicando uma boa concordância entre experimento e modelo teórico. A mesma análise foi realizada na validação das temperaturas de saída dos canais de alimentação ($T_{\text{out}} \text{ alimentação}$) e permeado ($T_{\text{out}} \text{ permeado}$) do módulo de dessalinização, como mostrado na Figura 6B. Os resultados experimentais de temperatura indicaram uma excelente concordância com o modelo teórico.

Adicionalmente, os resultados do fluxo de destilado em função da temperatura de entrada da alimentação para os três

níveis de vazão descritos no planejamento experimental são apresentados na Figura 6C, onde é observado que o fluxo de destilado experimental e o teórico são sensíveis ao aumento dessas duas variáveis, como reportado por Mesquita et al. (2022), que destacam que o aumento da temperatura de alimentação está exponencialmente relacionado com a pressão de vapor, afetando marcadamente o gradiente de pressão na espessura da membrana, e assim favorecendo o transporte de vapor d'água através dela. Por outro lado, a influência da vazão de alimentação no fluxo de permeado também era esperada, dado que um aumento na vazão da corrente líquida resulta em uma redução da espessura da camada limite, o que diminui efeitos de polarização de temperatura, proporcionando maior fluxo de permeado. Também é importante salientar que o modelo teórico proposto (modelo *lumped*) é muito útil para o projeto de equipamentos de dessalinização e pode ser usado para otimizar o processo, delimitando a região de busca

para uma eventual simulação via *computational fluid dynamics* (CFD), com redução do custo computacional.

3.3. UNIDADE PILOTO COM RECUPERAÇÃO DE CALOR DE MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

A partir da experiência com o protótipo de dessalinizador em ambiente relevante, o próximo objetivo é demonstrar uma unidade piloto de dessalinizador em ambiente operacional utilizando calor rejeitado do motor auxiliar de geração diesel-elétrica disponível em um navio pré-selecionado, o navio hidroceanoográfico Amorim do Valle da Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN). Também se considera a demonstração em uma ilha com farol da Marinha do Brasil (MB), ou mesmo em alguma das Organizações Militares (OM) em terra com acesso direto ao mar, empregando seus respectivos geradores. Foi então projetado o acoplamento entre um motor diesel e o circuito do dessalinizador. Além disso, outros aspectos em relação ao pré- e pós-tratamento da água de alimentação e de permeado foram abordados. Dimensões totais, arranjo e seleção dos componentes foram adequados ao espaço disponibilizado na casa de máquinas do navio selecionado e norteados pelas condições operacionais específicas. A Figura 7 mostra uma vista 3D geral do equipamento, com os principais componentes destacados e conexão com a tubulação de água quente omitida para melhor visualização. Com 26 m² de área de membrana, um único módulo seria capaz de produzir 88 L/h, suficiente para fornecer 16% da água potável consumida diariamente pela tripulação do navio selecionado, considerando a operação alternada do gerador diesel-elétrico, ou seja, capacidade máxima de produção por apenas 11 h/dia.

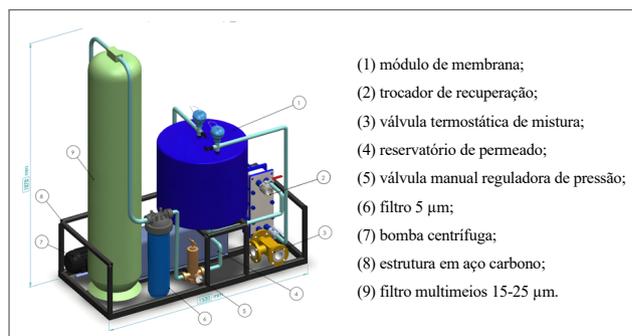


Figura 7. Vista 3D da unidade piloto do dessalinizador.

4. CONCLUSÕES

Os ensaios realizados tanto em bancada experimental quanto no protótipo indicam que as membranas comerciais usadas produzem água destilada de qualidade, com altos coeficientes de rejeição de sais. Os experimentos no protótipo também apresentam bons resultados para o fluxo de destilado e indicam aumento esperado com o aumento da temperatura de alimentação. O modelo teórico de parâmetros concentrados, validado pelos ensaios experimentais, mostrou-se útil para o projeto de equipamentos de dessalinização, como demonstrado no dimensionamento de uma unidade piloto para ambiente operacional capaz de integrar o processo com a recuperação de calor residual de motores de combustão.

FINANCIAMENTO

Agências de fomento CNPq, FAPERJ e CAPES/PROCAD Defesa e do projeto GALP/38 com a Petrogal/ANP.

REFERÊNCIAS

ANJOS, E. B.; CARDENAS GOMEZ, A. O.; CHENCHE, L. P. E.; LIMA, J. A.; NAVEIRA-COTTA, C. P.; COTTA, R. M.; LISBOA, K. M. Enhancing DCMD efficiency for desalination at module scale through dual heat recovery and retentate recirculation. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON CONVECTIVE HEAT AND MASS TRANSFER, 2022. Paper # CONV-22-A43* [...]. Turquia: ICHMT Digital Library Online, 2022. p. 533-540.

CÁRDENAS-GOMEZ, A. O.; SEDREZ, P. C.; SOUSA, G. N.; PINTO, J. G.; MORAES, D. B.; PENARANDA-CHENCHE, L. E.; Naveira Cotta, C. P.; AMARAL, P. S. T.; COTTA, R. M. Membrane distillation

demonstration unit with waste heat recovery for water desalination. *In: WORLD CONFERENCE ON ADVANCED MATERIALS FOR DEFENSE, AUXDEFENSE, 3., 2022. Paper # ID216* [...]. Portugal, 2022. p. 184-185.

CURCINO, I. V.; COSTA JÚNIOR, P. R. S.; CÁRDENAS-GOMEZ, L. E.; CHENCHE, P.; LIMA, J. A.; NAVEIRA-COTTA, C. P.; COTTA, R. M. Analysis of effective thermal conductivity and tortuosity modeling in membrane distillation simulation. *Micro and Nano Engineering*, v. 17, 100165, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.mne.2022.100165>

ELSAID, K.; SAYED, E. T.; YOUSEF, B. A. A.; RABAIA, M. K. H.; ABDELKAREEM, M. A.; OLABI, A. G. Recent progress on the utilization of waste heat for desalination: a review. *Energy Conversion and Management*, v. 221, 113105, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113105>

GUDE, V. G. *Emerging technologies for sustainable desalination handbook*. Butterworth-Heinemann: Elsevier, 2018.

LISBOA, K. M.; MORAES, D. B.; NAVEIRA-COTTA, C. P.; COTTA, R. M. 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*, v. 182, 116063, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116063>

MESQUITA, C.; CURCINO, I.; CARDENAS-GOMEZ, A. O.; LIMA, J. A.; NAVEIRA-COTTA, C. P.; COTTA, R. M. Experimental analysis of the heat and mass transfer of a flat sheet module of direct contact membrane distillation (DCMD) for desalination. In: BRAZILIAN

CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING, 19., 2022. *Paper # ENCIT2022-0325* [...]. Bento Gonçalves, 2022. p. 1-10.

SLEITI, A. K.; AL-AMMARI, W. A.; AL-KHAWAJA, M. Experimental investigations on the performance of a thermo-mechanical refrigeration system utilizing ultra-low temperature waste heat sources. *Alexandria Engineering Journal*, v. 71, p. 591-607, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.03.083>

THEKDI, A.; NIMBALKAR, S. U.; SUNDARAMOORTHY, S.; ARMSTRONG, K. O.; TAYLOR, A.; GRITTON, J. E.; WENNING, T.; CRESKO, J. *Technology assessment on low-temperature waste heat recovery in industry*. Report #ORNL/TM-2021/2150. Estados Unidos: Oak Ridge National Laboratory, 2021.

XU, J.; LIANG, Y.; LUO, X.; CHEN, J.; YANG, Z.; CHEN, Y. Techno-economic-environmental analysis of direct-contact membrane distillation systems integrated with low-grade heat sources: A multi-objective optimization approach. *Applied Energy*, v. 349, 121640, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121640>