








SISTEMA AUTÓCTONE DE REMOÇÃO DE CO₂: PURIFICANDO ATMOSFERAS CONFINADAS

Autochthone CO₂ removal system: purifying confined atmospheres

Paulo Christian Sedrez¹ , Vinicius de Freitas Caetano² ,
Felipe Brandão de Souza Mendes³ , Cristina Cardoso Pereira⁴ ,
Ana Carolina Pattacini Galdino Semitela⁵ , Carolina Locatelli Vago⁶ ,
Luz Dary Carreno Pineda⁷ , Nicolas Roger Jean Daniel Mermier⁸ ,
Matheus Labre Felisberto⁹ , Cristiano Piacsek Borges¹⁰ 

Resumo: O acúmulo de contaminantes, como o dióxido de carbono, em atmosferas confinadas que não dispõem de renovação natural consiste em uma das limitações operativas de submarinos onde há a necessidade de emprego de sistema de purificação de sua atmosfera. Remover o dióxido de carbono gerado pela tripulação consiste em um desafio tecnológico crítico, uma vez que efeitos nocivos aos tripulantes são observados já em concentrações reduzidas. Nessa condição de baixas pressões parciais de CO₂, há uma dificuldade para que se realize a remoção desse contaminante. O presente trabalho apresentou uma tecnologia inovadora para manter atmosferas confinadas purificadas, empregando módulos de membranas contactoras e de permeação gasosa. Foi fabricado um módulo contactor nacional e desenvolveu-se um modelo computacional para dimensionamento do equipamento.

Palavras-chave: Atmosfera confinada. Dióxido de carbono. Purificação. Módulos de membranas.

Abstract: The accumulation of contaminants, such as carbon dioxide, in confined atmospheres without natural renewal is one of the operating limitations of submarines, where a purification system is necessary to treat its confined atmosphere. Removing the carbon dioxide generated by the crew is a critical technological challenge, as harmful effects to the crew are already observed even at low concentrations. In this condition of low CO₂ partial pressures, it is difficult to remove this contaminant. The present work presented an innovative technology to keep the confined atmosphere purified, using contacting membrane and gas permeation modules. A national contactor module was manufactured and a computational model was developed for sizing the equipment.

Keywords: Confined atmosphere. Carbon dioxide. Purification. Membrane modules.

1. Primeiro-Tenente (EN), Ajudante da Divisão de Processos Químicos no Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM), Marinha do Brasil. Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC - Brasil. E-mail: paulo.sedrez@marinha.mil.br

2. Capitão-Tenente (EN), Encarregado da Divisão de Processos Químicos no IPqM, Marinha do Brasil. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: vinicius.caetano@marinha.mil.br

3. Capitão-Tenente (EN) do IPqM, Marinha do Brasil. Doutorando do Programa de Engenharia Química da UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: felipe.mendes@marinha.mil.br

4. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Doutora em Engenharia Química pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: cristina.cper@gmail.com

5. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Mestre em Engenharia Química pela PUC-Rio, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: anacarolina_galdino@poli.ufrj.br

6. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Mestre em Engenharia Mecânica pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: carolina.locatellivago@gmail.com

7. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Doutora em Engenharia Química pela Universidad Nacional de Colombia, Bogotá - Colômbia. E-mail: luz@peq.coppe.ufrj.br

8. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Mestre em Engenharia Química pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: nicolas@peq.coppe.ufrj.br

9. Bolsista do Projeto Sistema de Remoção de Contaminantes do IPqM, Marinha do Brasil. Mestrando em Engenharia Química pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: matheuslabre@eq.ufrj.br

10. Professor Associado da UFRJ. Doutor em Engenharia Química pela UFRJ, Rio de Janeiro, RJ - Brasil. E-mail: cristiano@peq.coppe.ufrj.br

1. INTRODUÇÃO

Espaços confinados de alta complexidade são característicos de ambientes onde não há possibilidade de renovação natural do ar. A contaminação do ar se dá por diferentes formas como processo de queima, aerossóis e vapores, além da constante presença humana da tripulação nesse tipo de ambiente por longos períodos. Os principais poluentes presentes são o dióxido de carbono (CO_2), o monóxido de carbono (CO), o hidrogênio (H_2), os aerossóis (desodorantes) e os vapores orgânicos (COV), sendo o CO_2 o mais abundante dos contaminantes. Espaços confinados dessa natureza ocorrem tipicamente em submarinos.

Pesquisadores (AMARAL; HABERT; BORGES, 2016; CERVEIRA, 2016) estudam processos químicos e físicos para a remoção de dióxido de carbono em aplicações industriais, como na extração de gás natural de reservatórios naturais, onde são encontradas elevadas concentrações de CO_2 junto ao metano ou para a purificação de gases de exaustão em processos de queima (ZHANG et al., 2021). Nesses tipos de aplicação, é comum o emprego de membranas poliméricas densas num processo denominado permeação gasosa.

Por outro lado, não há consenso a respeito da tecnologia para remoção de CO_2 em ambientes confinados. A problemática de atmosferas desse tipo, como a de um submarino, é caracterizada por uma maior complexidade, em virtude da reduzida concentração de CO_2 na qual a mesma precisa ser mantida para garantir o bem-estar da tripulação. O valor da concentração máxima permitida vem sendo reduzido conforme as normas são atualizadas ao longo dos anos (NATIONAL RESEARCH COUNCIL, 2007) e, normatizações mais atuais determinam que concentrações de 0,5 % de CO_2 (FSIS ENVIRONMENTAL, SAFETY AND HEALTH GROUP, 2020) garantem o bem-estar da tripulação para períodos de exposição de 8 horas, sendo que até 1 % tipicamente não são observados efeitos nocivos. A condição de baixa concentração está sob enfoque da comunidade científica devido ao interesse em capturar e aprisionar CO_2 diretamente do ar atmosférico com o objetivo de atenuar as implicações do efeito estufa, tendo em vista que diversos países já possuem plantas instaladas com esse propósito (DAVOODI et al., 2023).

As principais tecnologias empregadas para remoção de CO_2 de ambientes confinados, são as colunas de absorção

empregando aminas e as peneiras moleculares de zeólitas (PERSSON; WADSOE, 2002).

As colunas de absorção química empregam aminas líquidas, como a monoetanolamina (MEA). Esse fluido possui elevada afinidade com o CO_2 , de modo que ao promover o contato da fase gasosa contaminada com a MEA ocorre transferência de massa do CO_2 do gás para o líquido (MENDES, 2017). A jusante da coluna de absorção, a MEA saturada é direcionada a um regenerador e o ciclo se repete. A necessidade de elevado volume da coluna de absorção e da intermitência de funcionamento da regeneração, além de possibilidade de vazamentos tóxicos da MEA, que podem prejudicar a saúde da tripulação (FRANCO, 2021; LEUNG; CARAMANNA; MAROTO-VALER, 2014), consistem em desvantagens operacionais.

Na tecnologia de peneira molecular (PERSSON; WADSOE, 2002), são empregadas colunas de zeólitas que, quando submetidas a elevadas pressões do gás contaminado, aprisionam o CO_2 em sítios na sua matriz. Posteriormente, a peneira molecular é submetida a um processo de regeneração. Os aspectos negativos consistem no elevado volume ocupado pelo equipamento, as elevadas pressões necessárias para operação com risco de descompressão repentina e a intermitência de operação, uma vez que a peneira precisa ser regenerada. Além disso, em ambas as tecnologias usuais, o CO_2 ainda pode gerar bolhas ao ser purgado diretamente para o exterior do submarino, o que reduz a ocultação acústica do meio naval.

A tecnologia estudada e proposta neste trabalho consiste na continuação do trabalho do trabalho de Mendes (2017) e emprega módulos de membranas poliméricas, porosas, hidrofóbicas e na configuração de fibras ocas em conjunto com membranas densas de permeação gasosa para realizar os processos de remoção do CO_2 empregando água do mar como líquido absorvedor.

Módulos de membranas de fibras ocas vêm ganhando espaço em aplicações industriais (CUI; DEMONTIGNY, 2014; GABELMAN; HWANG, 1999), pois possuem vantagens operacionais quando comparados às colunas com processos de reações químicas. Possuem também elevada densidade de empacotamento e não misturam as diferentes fases envolvidas no processo. Sua versatilidade é refletida pelo diverso espectro de aplicações encontradas na literatura, como micro e ultrafiltração (CUI et al., 2013), destilação de

água salgada empregando fontes de calor de baixa exergia (LISBOA et al., 2021), remoção de gases dissolvidos de água para caldeiras e indústria de bebidas, clarificação de cerveja (AMBROSI; CARDOZO; TESSARO, 2014), pasteurização a frio de leite possibilitando maior conservação de sabor e produção de suplementos proteicos (TANUDJAJA et al., 2022), purificação de rejeitos da indústria têxtil (JI et al., 2020), elementos filtrantes para equipamentos de hemodiálise (GHOFRANI et al., 2023), entre outras.

As vantagens da tecnologia abordada neste trabalho em relação às que já são empregadas usualmente consistem em: ausência de compostos tóxicos; reduzidas pressões de operação; reduzido volume ocupado pelo equipamento; baixo consumo de energia; modo de operação contínua; e o fato de o contaminante eliminado do submarino já estar dissolvido na água do mar.

A Figura 1 apresenta uma representação esquemática da tecnologia de membranas proposta. O ar contaminado (1) é aspirado por um compressor (2) que direciona o ar para um módulo de membrana de permeação gasosa (3), onde é produzida uma corrente permeada (5) com concentração de CO_2 elevada (superior à concentração na alimentação) e outra retida (4). Essa corrente concentrada é pressurizada por um segundo compressor (6) e direcionada ao segundo módulo de membranas do tipo contactor (7) e possui membranas na configuração de fibras ocas. No interior das fibras escoa a fase gasosa que deixa o módulo (8), em contracorrente no lado do casco, uma bomba (10) faz o líquido (9) absorvedor (água salgada), deixando o módulo (11).

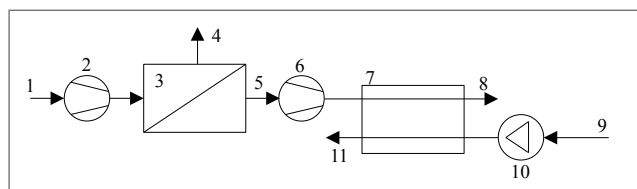


Figura 1. Diagrama esquemático do sistema de remoção de CO_2 deste trabalho: (1) ar contaminado; (2) compressor; (3) módulo de permeação; (4) corrente retida; (5) corrente permeada; (6) compressor; (7) módulo contactor; (8) saída da fase gasosa do contactor; (9) líquido absorvedor (água do mar); (10) bomba d'água; e (11) saída de água do módulo contactor.

pelo sistema carbonato. O fluxo de gás na saída do módulo contactor (4) e a corrente retida no módulo de permeação gasosa (3) retornam para a atmosfera confinada. O circuito de água é aberto, a água (5) é captada a partir do lado externo do casco do submarino e descartada após o processo de remoção (6). Nessa combinação de processos, realiza-se a remoção de CO_2 e a purificação da atmosfera confinada.

2. OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho consistiu em apresentar uma tecnologia inovadora e autóctone para promover a remoção de CO_2 de atmosferas confinadas. Para tanto, é necessária a realização de experimentos e a validação de modelo numérico, de modo que seja possível obter uma ferramenta para dimensionamento do equipamento proposto.

3. METODOLOGIA

Foram avaliados três módulos de membranas comerciais importados, sendo dois do tipo contactor (Comercial-1 e Comercial-2) e um módulo de permeação gasosa. Além disso, foram construídas fibras customizadas nacionais, projetadas especificamente para a remoção de CO_2 . As fibras foram instaladas em um módulo customizado (Figura 2). O desempenho das fibras nacionais foi obtido na mesma metodologia empregada para os módulos comerciais.

As membranas do módulo customizado (Figura 2) foram fabricadas pelo método de extrusão úmida. A solução polimérica empregada é composta por uma mistura de polímero (fluoreto de polivinilideno) e solvente (n-metil-2-pirrolidona) em conjunto com o aditivo formador de poro (ácido adípico) e o aditivo hidrofóbico (nanopartículas de politetrafluoretileno — PTFE).

As nanopartículas de PTFE foram dispersas no solvente e posteriormente o polímero foi adicionado em frações de 10% do total, até atingir 50%. Os 50% restantes foram adicionados de uma só vez. A solução foi mantida sob agitação mecânica por 24 h para garantir solubilização completa do polímero, além de mais 24 h antes da fabricação das membranas. A mistura do líquido interno empregado no processo de extrusão continha n-metil-2-pirrolidona, polivinilpirrolidona

e água. Para o banho de precipitação, empregou-se água microfiltrada a 25°C.

As membranas obtidas foram mantidas em água microfiltrada, fazendo diversas trocas durante 3 dias, e finalmente foi feito o processo de troca de solvente: etanol por 90 minutos e hexano por 90 minutos. Finalizado esse tempo, as membranas foram para a etapa de secagem em temperatura ambiente.

Os módulos de membranas contactoras tiveram seu desempenho avaliado em aparato experimental, no qual são empregados um compressor de ar e um cilindro com dióxido de carbono puro (marca Linde, pureza 99,99%). A concentração e a vazão de alimentação de gás dos módulos são definidas por meio de dois controladores de vazão, posicionados na tubulação entre os cilindros de gases e o módulo de membranas caracterizado, direcionando o gás para o lado interno das fibras ocas. Uma bomba centrífuga d'água faz com que o líquido absorvedor (água) escoe pelo lado de fora das fibras. Essa configuração é necessária pois os módulos comerciais possuem fibras com diâmetro reduzido, o que causaria perda de carga elevada caso a água escoasse no interior das fibras ocas.

Após realizar a passagem pelo módulo, a corrente gasosa é direcionada alternadamente para um bolhômetro e um cromatógrafo

gasoso previamente calibrado com as misturas de gases padrão (marca *White Martins*, composição 0,7% CO₂, 20,7% O₂ e 78,6% N₂), onde é realizada a medição da composição. O circuito de água foi operado em duas configurações: em circuito fechado (F) com correção do pH por meio de bomba dosadora de solução básica; e em circuito aberto (A) com a água passando apenas uma vez pelo módulo. Desse modo, por meio de um balanço de massa na fase gasosa, é possível medir experimentalmente a taxa de dióxido de carbono removida para cada vazão de líquido.

A Figura 3 apresenta resultados de desempenho em termos do coeficiente adimensional de transferência de massa global experimental de cada módulo contactor testado dado pelo número de Sherwood (*Sh*) (Equação 1), que consiste num parâmetro adequado para avaliação em aplicações envolvendo transferência de massa. Para módulos de membranas, avalia-se *Sh* em função do número adimensional de Graetz (Equação 2), que por sua vez depende da vazão do líquido e da geometria do módulo. Desse modo, é possível realizar comparações de desempenho entre módulos de geometrias distintas.

$$Sh = \frac{k \cdot D_h}{D} \quad (1)$$

$$Gz = \frac{D_E^2 \cdot v_m}{D \cdot L} \quad (2)$$

Onde:

k: o coeficiente de transferência de massa na fase líquida em [m/s];

D_h: o diâmetro hidráulico em [m] do lado do líquido;

D: a difusividade do CO₂ na água em [m²/s];

D_E: o diâmetro externo da fibra oca em [m];

v_m: a velocidade média de escoamento da água no módulo em [m/s];

L: o comprimento do módulo em [m].

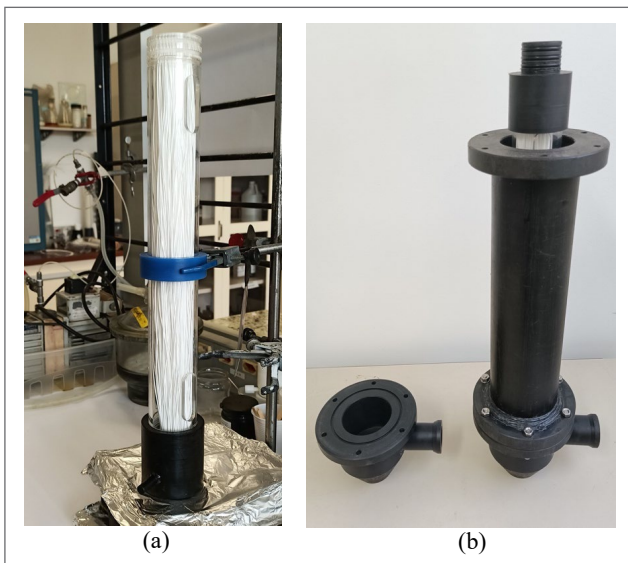


Figura 2. Foto do módulo customizado construído neste trabalho. As fibras ocas foram fabricadas por extrusão seguida de banho. Foram dispostas em (A) casco acrílico e vedadas com resina de alto desempenho. O elemento de acrílico é posicionado (B) no interior do casco.

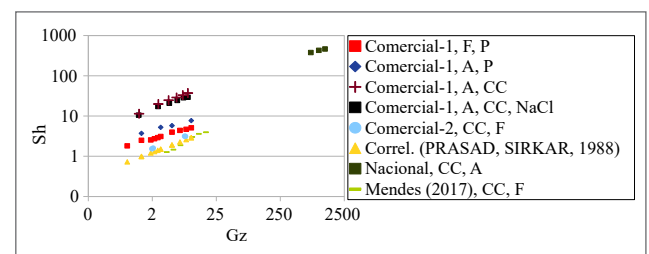


Figura 3. Desempenho da remoção de dióxido de carbono dos módulos contactores testados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observa-se (Figura 3) que o módulo contactor Comercial-1 obteve desempenho significativamente superior quando comparado ao outro módulo comercial analisado (Comercial-2). Além disso, o módulo Comercial-1 apresentou coeficientes de transferência de massa bem superiores aos valores de correlações empíricas da literatura (PRASAD; SIRKAR, 1988) para remoção de CO₂ nas condições testadas.

Já o módulo nacional obteve números de Graetz superiores devido à sua geometria. Entretanto, seu desempenho apresentou tendência coerente com a dos módulos comerciais. A configuração de circulação de água em circuito aberto (A) apresentou maiores remoções de CO₂ da corrente gasosa. Isso ocorre por conta da presença de maiores quantidades de sais na configuração fechada devido à necessidade de correção contínua do pH com o tempo de operação do experimento. Ainda na Figura 3, ao comparar a taxa de remoção de CO₂ das configurações das correntes de gás e de líquido entre contra-corrente (CC) e paralelo (P), observa-se que a primeira é bastante superior em relação à segunda, conforme verificado na literatura (CUI; DEMONTIGNY, 2014).

Com o contactor Comercial-1, foram realizados testes com adição de cloreto de sódio (NaCl) em água doce, na mesma concentração da água do mar. A quantidade de CO₂ removido foi, em média, 7% inferior ao teste empregando apenas água doce nas mesmas condições experimentais. Tal efeito é devido à presença do sal dissolvido reduzir a solubilidade do CO₂ na água.

Em conjunto com as análises experimentais, foi desenvolvido um modelo computacional de simulação do módulo contactor no *software* EMSO (SOARES; SECCHI, 2003). Para as condições de operação do módulo comercial, a diferença entre a simulação numérica e os resultados experimentais foi menor do que 10%, portanto o modelo está validado. O modelo numérico do módulo de permeação gasosa é de origem comercial, uma vez que a elaboração da versão nacional ainda está em andamento. Portanto, os dados necessários do permeador foram obtidos diretamente do fabricante, nos quais o desempenho do módulo de permeação espelha as condições operacionais do submarino. Assim, a ferramenta de dimensionamento foi empregada para quantificar a quantidade de módulos necessária para

purificar uma atmosfera confinada hipotética nas proporções de um submarino.

Desse modo, obteve-se pelo modelo computacional desenvolvido a demanda nominal de área de membranas contactoras e de permeação necessária para manter a atmosfera confinada com concentração de CO₂ abaixo do nível nocivo aos tripulantes. Essa quantidade de área nominal foi incrementada em oito vezes, assim obtém-se coeficiente de segurança adequado para esse sistema crítico do submarino. O volume final do equipamento de remoção, incluindo os módulos de membranas, bombas, compressores e tubulações, foi de 0,5% do volume respirável do submarino hipotético avaliado, que consiste em um valor coerente com a pouca disponibilidade de espaço característica do meio naval operativo em questão.

Novas análises serão realizadas em trabalhos futuros para verificação do impacto da incrustação de matéria orgânica e inorgânica presente na água do mar para os módulos de membranas contactoras nacional e comercial e também a operação em testes de longa duração.

5. CONCLUSÕES

O presente trabalho propôs uma solução inovadora autócotone para a purificação de atmosferas confinadas, como a de submarinos. Foi fabricado um módulo de membranas de fibras ocas especificamente para essa aplicação, obtendo resultados de desempenho adequados, que consiste em contribuição relevante para a nacionalização da tecnologia de membranas, uma vez que não existem fabricantes nacionais e a tecnologia possui muitas aplicações duais. Foi desenvolvida uma ferramenta de modelagem computacional para realizar o dimensionamento do sistema proposto em função da demanda necessária. A tecnologia proposta possui vantagens operativas quando comparada às técnicas usuais de remoção de contaminantes. Futuras análises serão realizadas para avaliar a vida útil do módulo de membranas ao utilizar água do mar.

FINANCIAMENTO

A equipe responsável por este trabalho agradece à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) pelo fomento desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, R. A.; HABERT, A. C.; BORGES, C. P. Performance evaluation of composite and microporous gas-liquid membrane contactors for CO₂ removal from a gas mixture. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 102, p. 202-209, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2016.01.018>
- AMBROSI, A.; CARDOZO, N. S. M.; TESSARO, I. C. Membrane separation processes for the beer industry: a review and state of the art. *Food and Bioprocess Technology*, v. 7, n. 4, p. 921-936, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1275-0>
- CERVEIRA, G. S. *Remoção de CO₂ do biogás por permeação em membranas*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- CUI, Z.; DEMONTIGNY, D. Part 7: A review of CO₂ capture using hollow fiber membrane contactors. *Carbon Management*, v. 4, n. 1, p. 69-89, 2014. <https://doi.org/10.4155/cmt.12.73>
- CUI, Z.; HASSANKIADEH, N. T.; LEE, S. Y.; LEE, J. M.; WOO, K. T.; SANGUINETI, A.; ARCELLA, V.; LEE, Y. M.; DRIOLI, E. Poly(vinylidene fluoride) membrane preparation with an environmental diluent via thermally induced phase separation. *Journal of Membrane Science*, v. 444, p. 223-236, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.05.031>
- DAVOODI, S.; AL-SHARGABI, M.; WOOD, D. A.; RUKAVISHNIKOV, V. S.; MINAEV, K. M. Review of technological progress in carbon dioxide capture, storage, and utilization. *Gas Science and Engineering*, v. 117, 205070, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.gjsce.2023.205070>
- FRANCO, M. B. *Desenvolvimento de membrana hidrofóbica para utilização em contactores de membranas para separação do CO₂*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021.
- FSIS ENVIRONMENTAL, SAFETY AND HEALTH GROUP. *Carbon Dioxide: Health Hazard Information Sheet*. FSIS Environmental, Safety and Health Group, 2020. Disponível em: https://www.fsis.usda.gov/sites/default/files/media_file/2020-08/Carbon-Dioxide.pdf. Acesso em: 22 ago. 2023.
- GABELMAN, A.; HWANG, S. Hollow fiber membrane contactors. *Journal of Membrane Science*, v. 159, n. 1-2, p. 61-106, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0376-7388\(99\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0376-7388(99)00040-X)
- GHOFRANI, B.; OGHYANOUS, F. A.; KARSAZ, M.; GOLKAR, M.; ETEMADI, H.; KHOSROSHAHI, H. T.; YEGANI, R. Fabrication and characterization of novel pes-based nanocomposite hollow fiber membranes for the hemodialysis process. *Separation and Purification Technology*, v. 317, 123939, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.123939>
- JL, D.; XIAO, C.; CHEN, K.; AN, S.; GAO, Y.; ZHOU, F.; ZHAN, T. Completely green and sustainable preparation of PVDF hollow fiber membrane via melt-spinning and stretching method. *Journal of Hazardous Materials*, v. 398, 122823, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122823>
- LEUNG, D. Y. C.; CARAMANNA, G.; MAROTO-VALER, M. M. An overview of current status of carbon dioxide capture and storage technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 39, p. 426-443, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.093>
- LISBOA, K. M.; BUSSON, D.; NAVIERA-COTTA, C. P.; COTTA, R. M. Analysis of the membran effecton the efficiency of water dessalination 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>
- MENDES, F. B. S. *Remoção de CO₂ de ambientes confinados utilizando contactores com membranas e água do mar sintética como absorvente*. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. *Emergency and Continuous Exposure Guidance Levels for Selected Submarine Contaminants*. Washington, D.C.: National Academies Press, 2007. v. 1.
- PERSSON, O.; WADSOE, L. Indoor Air Quality In Submarines". In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDOOR AIR QUALITY AND CLIMATE. *Anais [...]*. 2002. p. 806-811.
- PRASAD, R.; SIRKAR, K. K. Dispersion-free solvent extraction with microporous hollow-fiber modules. *AIChE Journal*, v. 34, n. 2, p. 177-188, 1988. <https://doi.org/10.1002/aic.690340202>
- SOARES, R. P.; SECCHI, A. R. EMSO: A new environment for modelling, simulation and optimisation. *Computer Aided Chemical Engineering*, v. 14, p. 947-952, 2003. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(03\)80239-0](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(03)80239-0)
- TANUDJAJA, H. J.; ANANTHARAMAN, A.; NG, A. Q. Q.; MA, Y.; TANIS-KANBUR, M. B.; ZYDNEY, A. L.; CHEW, J. W. A review of membrane fouling by proteins in ultrafiltration and microfiltration. *Journal of Water Process Engineering*, v. 50, 103294, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103294>
- ZHANG, H.; XUE, K.; CHENG, C.; GAO, D.; CHEN, H. Study on the performance of CO₂ capture from flue gas with ceramic membrane contactor. *Separation and Purification Technology*, v. 265, 118521, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118521>