



INTENSIFICATION OF CO₂ REMOVAL FROM LOW PARTIAL PRESSURE
STREAMS COUPLING GAS PERMEATION AND MEMBRANE
CONTACTORS

Felipe Brandão de Souza Mendes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Orientador: Cristiano Piacsek Borges

Rio de Janeiro
Março de 2024

INTENSIFICATION OF CO₂ REMOVAL FROM LOW PARTIAL PRESSURE
STREAMS COUPLING GAS PERMEATION AND MEMBRANE
CONTACTORS

Felipe Brandão de Souza Mendes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA QUÍMICA.

Orientador: Cristiano Piacek Borges

Aprovada por: Eng. Priscila Simões Teixeira Amaral

Prof. Matthias Wessling

Prof. Renato Machado Cotta

Prof. Wilson Mantovani Grava

Prof. Argimiro Resende Secchi

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MARÇO DE 2024

Brandão de Souza Mendes, Felipe

Intensification of CO₂ removal from low partial pressure streams coupling gas permeation and membrane contactors/Felipe Brandão de Souza Mendes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2024.

XXIV, 111 p.: il.; 29,7cm.

Orientador: Cristiano Piacsek Borges

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Química, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 84 – 99.

1. Confined Space. 2. CO₂ removal. 3. Process Intensification. 4. Gas Permeation. 5. Membrane Contactor. 6. Facilitated Transport. I. Piacsek Borges, Cristiano. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Química. III. Título.

*E o Verbo se fez carne, e habitou
entre nós, e vimos a sua glória,
como a glória do unigênito do
Pai, cheio de graça e de verdade
João 1:14*

*Dedico esta tese ao meu pai
Sérgio Mendes (in memoriam),
pelos ensinamentos que me
foram dados.*

Agradecimentos

Agradeço a Deus e à Marcela pelo amor incondicional. Nessa longa jornada, muita coisa mudou, o mundo parou, mas a vida foi retomada com outro significado. O José nasceu e a vida que já era boa ficou ainda melhor. Não vou dizer que foi fácil, nem tão pouco trabalhoso, porém chegar até aqui é gratificante.

Foram muitas aventuras nessa caminhada e eu não poderia deixar de agradecer aos meus familiares primeiro. À minha mãe, Isabel, pelo incentivo pela busca de uma sólida formação profissional. Ao meu irmão, Eduardo, por me inspirar a trabalhar melhor por meio dos seus resultados. Ao meu avô, Jorge, por ter me ensinado o valor real da retribuição do trabalho. Às minhas tias, Cláudia e Alice, pelo apoio incondicional em qualquer situação. Aos meus sogros, Cecília e Adilson, pela união da família e rede de apoio.

Não seria possível chegar ao final da tese sem a orientação precisa do Prof. Cristiano Borges que me acompanha desde o mestrado. Agradeço, também, a Cristina Cardoso por toda a paciência em ouvir minhas dificuldades, ler as inúmeras versões e pela amizade que vem do CEGN quando comecei minha caminhada no mundo das membranas. Agradeço ao Prof. Renato Cotta pela confiança.

Dentro da Marinha, em especial no IPqM, agradeço a CC(EN) Priscila por toda a orientação e todos os conselhos que me foram dados. Ainda temos muito trabalho pela frente e tenho certeza que novos frutos virão. À equipe do projeto, agradeço em nome do CT(EN) Vinícius e do 1T(EN) Sedrez por todo o empenho e dedicação ao trabalho, bem como à camaradagem ao longo dessa jornada. Não posso deixar de agradecer a CMG(EN) Ana de Falco por ter me incentivado e me inspirado a fazer o doutorado.

I am grateful to my colleagues in Aachen, particularly Prof. Matthias Wessling for having me at CVT, Hannah Roth for patiently reviewing my work, Jens Rubner and Carla Esch for their support throughout my time there, and the DWI B0.56 team for allowing me to join them at the beginning. I also appreciate Siqi and Sherry for their kindness to me and my family, and Maria Restrepo for her support. Surprisingly, I met an amazing Brazilian friend, Nelson, in Aachen, whom I am thankful for his loyalty and friendship. Without him, my time in Aachen would not have been the same.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

INTENSIFICAÇÃO DA REMOÇÃO DE CO₂ DE CORRENTES COM BAIXA PRESSÃO PARCIAL ACOPLANDO PERMEAÇÃO DE GÁS E CONTACTORES COM MEMBRANAS

Felipe Brandão de Souza Mendes

Março/2024

Orientador: Cristiano Piacsek Borges

Programa: Engenharia Química

O acúmulo de CO₂ na atmosfera de Espaços Confinados Itinerantes (ECI) é crítico para a segurança da tripulação, pois pode afetar sua cognição, se CO₂ ultrapassar certos limites. O desenvolvimento de um processo nacional de remoção de CO₂ possibilita independência tecnológica e o grande desafio a ser enfrentado é a remoção de CO₂ a baixa pressão parcial. Simulações de processo revelaram que o acoplamento de permeação de gás e contactor com membrana intensificou a remoção de CO₂, o que foi refletido em uma diminuição na área de membrana. A simulação também forneceu curvas operacionais correlacionando as propriedades de transporte de membrana (permeância e seletividade) com a área da membrana, que são importantes para orientar o desenvolvimento de membranas de permeação de gás, visto que a falta de membranas comerciais foi identificada. Membranas contendo microgéis funcionalizados com aminas foram fabricadas usando a técnica de *spray-coating*. A melhor membrana apresentou 100 GPU de CO₂ e 50 de seletividade CO₂/N₂. Os microgéis foram produzidos continuamente em um reator de fluxo laminar, permitindo o escalonamento da síntese. O volume do equipamento foi conservadoramente estimado em 11,6 m³ quando se correlacionaram as propriedades da melhor membrana sintetizada com os resultados da simulação. Esta tese contribuiu para o desenvolvimento de um processo de remoção de CO₂ para ECI.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INTENSIFICATION OF CO₂ REMOVAL FROM LOW PARTIAL PRESSURE
STREAMS COUPLING GAS PERMEATION AND MEMBRANE
CONTACTORS

Felipe Brandão de Souza Mendes

March/2024

Advisor: Cristiano Piacsek Borges

Department: Chemical Engineering

CO₂ accumulation in the atmosphere of Intinerant Confined Spaces (ICS) is critical for crew safety because it can affect their cognition if CO₂ concentration exceeds certain limits. The development of a national process for CO₂ removal enables technological independence, and the major challenge is to remove CO₂ at low partial pressures. Process simulations revealed that the process coupling of gas permeation and the membrane contactor enhanced CO₂ removal, which was reflected in a smaller membrane area. The simulation also provided operational curves correlating the membrane transport properties (permeance and selectivity) with the membrane area, which are important for guiding gas permeation membrane development because a lack of commercial membranes has been identified. Amine-functionalized microgels containing 100 GPU of CO₂ and 50 GPU of CO₂/N₂ selectivity were fabricated using a spray coater. The microgels were continually produced in a laminar flow reactor, allowing scale-up of the synthesis. The volume of the equipment was conservatively estimated as 11.6 m³ when correlating the best-synthesized membrane properties with the simulation results. This thesis contributes to the development of a CO₂ removal process for ICS.