

ANÁLISE TERMOFLUIDODINÂMICA DE FLUIDOS RICOS EM CO₂ + IMPUREZAS

Mariana Dill Carvalho, Antonio Marinho Barbosa Neto

INTRODUÇÃO

O Acordo de Paris de 2015 incentivou a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renovável e a redução das emissões de gases de efeito estufa. De acordo com o estudo de Chaczykowski (2012), a tecnologia de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) é considerada o caminho para fontes de energia mais limpas, baseadas em combustíveis fósseis. Esse método evidencia o escoamento de misturas ricas em CO₂ sob condições supercríticas, que favorecem o transporte de maiores quantidades de fluido por dutos de menor diâmetro e a injeção desse componente em reservatórios de petróleo de forma mais segura (Miotto, 2025). No entanto, essas condições podem afetar as propriedades termofísicas e o comportamento de fases nos processos de escoamento em tubulações e em meios porosos. A fim de evitar problemas relacionados à integridade dos dutos, garantia de escoamento, segurança e aspectos operacionais, faz-se necessário o planejamento prévio de toda a infraestrutura de transporte de CO₂. Assim, este trabalho tem como objetivo investigar as propriedades termofluidodinâmicas do escoamento multifásico transiente de misturas ricas em CO₂ com presença de impurezas.

DESENVOLVIMENTO

Dois estudos de caso foram criados: combinações de 0,845 mol CO₂ com 0,155 mol de impurezas de metano (CH₄) e monóxido de carbono (CO). A caracterização termodinâmica dessas misturas e a representação gráfica de seus limites de estabilidade de fases foram feitas por meio do software de modelagem PVT (Pressão-Volume-Temperatura), *Multiflash* (KBC/Infocem). A Equação de Estado utilizada foi a EOS-CG, modelo desenvolvido para predição das propriedades termodinâmicas dos componentes de misturas ricas em CO₂, considerando impurezas presentes em gases úmidos e de combustão. As caracterizações PVT de cada mistura consideraram os mesmos intervalos de pressão (10 bar a 70 bar) e de temperatura (-50°C a 15°C). O software de simulação de escoamento multifásico transiente, *ALFAsim*, foi utilizado para simular as condições de transporte transiente das misturas e avaliar as propriedades termofluidodinâmicas. Os dois casos consideraram uma tubulação horizontal de aço carbono de 10", com 1 mm de rugosidade da camada interna e 10 km de comprimento. As condições de contorno foram de 58 bar e 15°C no nó de pressão, e de 20 kg/s e 15°C no nó de massa. A condição de temperatura externa à tubulação para ambos os casos é de -13°C, com uma velocidade média do ar de 10 m/s. Além disso, a física do modelo descreve a transferência de calor por uma Equação Global, cuja correlação de convecção natural é a de Hasan e Kabir (1994).

RESULTADOS

Da perspectiva do equilíbrio de fases, avaliou-se o efeito da presença de impurezas sobre o comportamento de fases das misturas. O equilíbrio líquido-vapor do CO₂ puro é representado em um diagrama de pressão versus temperatura por uma linha de saturação que conecta o ponto triplo e o ponto crítico, enquanto que a presença de impurezas divide essa linha de equilíbrio em uma linha de pontos de orvalho e outra de pontos de bolha, formando um envelope de fases e favorecendo a coexistência das fases líquida e gasosa (Lovseth, 2013). Nesse cenário, diferentes impurezas, como monóxido de carbono e metano, causam alterações distintas nas pressões críticas e nas regiões bifásicas dos envelopes de fases. Uma mistura de moléculas com

interações fracas (forças de dispersão), como metano e monóxido de carbono, favorece a idealidade, uma vez que não gera energia extra ou distorce o arranjo molecular. Essa área de instabilidade de fases menor resulta no estreitamento do envelope de fases, na redução da pressão crítica (83,64 bar) e no aumento da temperatura crítica (18,45°C). Por outro lado, misturas com interações mais fortes (dipolo-dipolo permanente), como monóxido e dióxido de carbono, criam regiões de energia mínima local, favorecendo a separação de fases (aumento da região bisáfica), o aumento da pressão crítica (91,68 bar) e a redução da temperatura crítica (16,45 °C). As variáveis dessas mudanças de fases das misturas, em termos de escoamento em regime transiente, foram observadas considerando dois dias de simulação. As Figuras 1 e 2 evidenciam o desempenho da fração volumétrica e do padrão de escoamento em função das reduções de pressão e temperatura. Conforme a fração de vazio reduz e a de líquido aumenta em relação ao tubo, ocorre a mudança do padrão de escoamento de monofásico de gás para o escoamento bifásico estratificado. Nesse trecho de escoamento multifásico denso (de 0 a 2000 m), observa-se o aumento da perda de carga espelhado em um gradiente de fricção mais elevado. Na região intermediária (de 2000 a 6000 m) com a redução da fração volumétrica de líquido e da resistência ao escoamento, nota-se um gradiente de fricção menor. Por fim, as variações das propriedades físicas do fluido decorrentes das mudanças na pressão absoluta e na temperatura da mistura do trecho final (de 6000 a 10000 m), intensificam o gradiente friccional.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados alcançados mostram que a presença de impurezas, como monóxido de carbono e metano, afetam as propriedades termofluidodinâmicas do escoamento de CO₂ em tubulações. Essas variações podem exigir o uso de dutos de maiores diâmetros e que suportem maiores condições de pressões, resultando em aumento dos custos operacionais. Além disso, apesar da mistura de moléculas com interações fracas favorecer a região de estabilidade e o estreitamento do envelope de fases, suas mudanças de fases ocorrem em temperaturas mais elevadas devido ao aumento da temperatura crítica. A rápida formação de condensado líquido favorece a ocorrência de *slugging* severo, nucleação de hidratos de CO₂, formação de ácido carbônico altamente corrosivo e de outros problemas relacionados à garantia de escoamento. Portanto, reafirma-se a importância do estudo das variáveis do escoamento multifásico das misturas ricas em CO₂ dos processos de Captura e Armazenamento de Carbono (CCS) para o dimensionamento prévio das linhas e o planejamento das operações.

Palavras-chave: CO₂; impurezas; equilíbrio de fases; escoamento multifásico; CCS.

ILUSTRAÇÕES

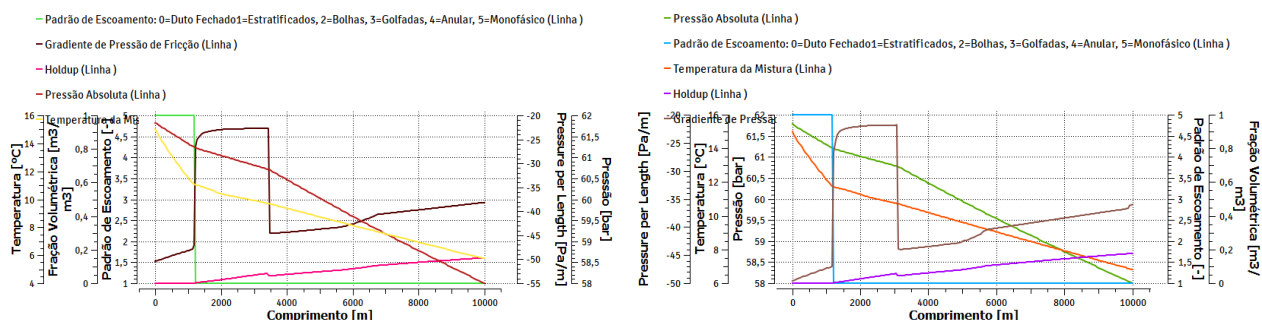


Figura 1. Escoamento Multifásico CO₂+CO. **Figura 2.** Escoamento Multifásico CO₂+CH₄.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CHACZYKOWSKI, Maciej; OSIADACZ, Andrzej J. Dynamic simulation of pipelines containing dense phase/supercritical CO₂-rich mixtures for carbon capture and storage. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 9, p. 446-456, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP. Produção primária de energia no Brasil. Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/producao-primaria-de-energia-no-brasil/>. Acesso em: 30 ago. 2025.

LEGOIX, Ludovic Nicolas et al. Phase equilibria of the CH₄-CO₂ binary and the CH₄-CO₂-H₂O ternary mixtures in the presence of a CO₂-rich liquid phase. *Energies*, v. 10, n. 12, p. 2034, 2017.

LOVSETH, Sigurd W. et al. CO₂mix project: Experimental determination of thermo physical properties of CO₂-rich mixtures. *Energy Procedia*, v. 37, p. 2888-2896, 2013.

MIOTTO, Natália Kauana Gesser. Análise do Impacto de Impurezas em Misturas RICAS em CO₂ em Aplicações CCS/CCUS . 2025. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina.

SIVIERI, F. M.; TEIXEIRA, E. P. ESTIMATIVA DO MODELO DINÂMICO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO. 2017.

DADOS CADASTRAIS

BOLSISTA: Mariana Dill Carvalho

MODALIDADE DE BOLSA: PROBIC-AF/UDESC (IC)

VIGÊNCIA: 01/09/2024 a 31/08/2025 – Total: 12 meses

ORIENTADOR: Antonio Marinho Barbosa Neto

CENTRO DE ENSINO: CESFI

DEPARTAMENTO: Departamento de Engenharia de Petróleo

ÁREAS DE CONHECIMENTO: Engenharias / Engenharia Mecânica / Fenômenos de Transporte

TÍTULO DO PROJETO DE PESQUISA: Análise Integrada de Sistemas de Produção de Petróleo.

Nº PROTOCOLO DO PROJETO DE PESQUISA: NPP3420-2020