APLICAÇÃO DE SEPARADOR SUPERSÔNICO PARA REMOÇÃO DE CO₂: AVALIAÇÃO UTILIZANDO FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL

M. C. AMARAL¹, T. S. KLEIN² E R. A. MEDRONHO²

¹ Petrobras-Centro de Pesquisas Leopoldo Américo Miguez de Mello

² Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química

Email para contato: marceloamaral@petrobras.com.br

RESUMO – O aumento da produção de gás natural na área conhecida como pré-sal da Bacia de Santos, associado a elevados teores de CO₂ (até 45% *molar*), tem motivado o uso de tecnologias compactas, como a usada em separadores supersônicos, para o tratamento do gás natural, com o objetivo de levar à redução de custos de produção. A condensação promovida pela redução de temperatura dentro do equipamento pode conduzir à remoção de CO₂, rico na fase líquida. Neste trabalho, a fluidodinâmica computacional foi utilizada para simular o escoamento do gás natural no interior de um separador supersônico. O modelo numérico foi validado com dados da literatura e posteriormente utilizado para avaliar a separação de CO₂ do gás natural através de tecnologia supersônica.

1. INTRODUÇÃO

O aumento da produção de gás natural no Brasil, principalmente devido à produção nos campos do Pré-Sal, tem demandado o uso de tecnologia compacta, como a separação supersônica, para atender a necessidade de redução de área necessária para realizar o tratamento do gás natural.

Separadores supersônicos vêm sendo utilizados para remoção de água do gás natural, podendo-se utilizar do mesmo princípio para a remoção de CO₂. Ao entrar no equipamento de separação supersônica, o gás é acelerado e, através de dispositivos internos, o gás adquire velocidade tangencial. A geometria similar a de um bocal convergente-divergente faz com que o gás atinja velocidades supersônicas, o que possibilita a redução de temperaturas a valores suficientemente baixos para promover a condensação de água ou hidrocarbonetos pesados presentes no gás. Devido a componente tangencial da velocidade, o líquido é concentrado na parede do equipamento e coletado antes da mistura bifásica atingir a saída, para onde o gás tratado é direcionado (OKIMOTO e BROUWER, 2002).

O objetivo deste trabalho é investigar a utilização de um separador supersônico para separar CO₂ do gás natural. Para isso, utilizou-se CFD.

2. MODELAGEM MATEMÁTICA

2.1. Equações de Conservação

O escoamento no interior do separador supersônico é considerado compressível e pode ser modelado pelas equações de conservação da massa, da quantidade de movimento linear e da energia, sendo apresentadas nas equações Equação 1, Equação 2 e Equação 3, respectivamente. Nesse trabalho inicial está sendo considerado escoamento monofásico.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \rho \mathbf{f}_B \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho e}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho (e + p \mathbf{v}) \mathbf{U}] = \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{U}) - \nabla \cdot \mathbf{q} + \dot{q}_v \quad (3)$$

Em que ρ é massa específica, t é tempo, $\mathbf{U}$ é o vetor velocidade, p é pressão, $\boldsymbol{\tau}$ é o tensor tensão viscosa, $\mathbf{f}_B$ é a resultante das forças de campo, e representa a energia total, $\dot{q}_v$ é a taxa de calor gerado e $\mathbf{q}$ é o fluxo de calor.

3. METODOLOGIA

Todas as simulações foram conduzidas com o pacote de ferramentas CFD ANSYS Fluent. Os resultados obtidos por ARINA (2004) foram usados na validação da modelagem e dos métodos numéricos. Foi simulado um escoamento em bocal convergente-divergente (C-D), o que representa a geometria típica utilizada em separadores supersônicos. Usou-se o método SIMPLE para acoplamento pressão-velocidade na solução das equações de conservação. Para a interpolação dos valores das variáveis de escoamento na face foi usado esquema *upwind* de segunda ordem. O critério de convergência adotado foi de 10^{-6} para a equação da energia e 10^{-3} para as outras equações. O modelo de turbulência $k - \epsilon$ (Tannehill et al., 1997) e a abordagem invíscida foram utilizados com o objetivo de avaliar a influência da modelagem da turbulência nos resultados. A equação de estado (EOS) RK, mesma adotada em YANG et al. (2014), foi utilizada nesse trabalho. Foi realizado teste de malha, sendo observado que uma malha de 245.000 elementos já não influenciava no resultado. As condições de contorno das simulações foram definidas, conforme apresentado por ARINA (2004). Em seguida, com o objetivo de avaliar a capacidade do separador supersônico em remover CO_2 do gás natural, foram utilizadas as condições apresentadas em YANG et al. (2014) por estarem próximas às de aplicação industrial desse tipo de equipamento. O fluido utilizado foi gás natural com percentual molar de CO_2 igual a 45%. As condições de contorno das simulações foram definidas, conforme apresentado por YANG et al. (2014). Após a realização de testes de malha, foi adotada uma malha com 46.000 elementos. Como ferramenta para o cálculo do envelope de fase do gás, foi utilizado o simulador de processo Aspen HYSYS. A curva P-T é obtida

da simulação de escoamento e a avaliação da composição da fase gasosa é realizada com o Aspen HYSYS.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O perfil de pressão obtido para o bocal convergente-divergente de ARINA (2004) é apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Comparação entre os perfis de pressão obtidos neste trabalho e por ARINA (2004).

Reproduziu-se os resultados obtidos em ARINA (2004) para a condição de escoamento inviscido. A consideração dos efeitos relacionados à turbulência, que foram negligenciados por ARINA (2004), deslocam a onda de choque para montante, em direção à garganta.

Para avaliar se o separador supersônico tem potencial para remover CO_2 , o caminho de pressão e temperatura percorrido pelo gás no interior do separador supersônico obtido na simulação CFD, com modelagem inviscida, é apresentado na Figura 2, juntamente com o envelope de fase do gás natural com alto teor de CO_2 . Observa-se que o gás

Figura 2 – Envelope de fase e curva P-T para o gás natural com alto teor de CO_2 no separador supersônico.

atinge regiões do envelope de fase onde a fase gasosa possui teor de CO_2 abaixo de 6% molar, indicando que se a coleta da fase condensada fosse realizada nesse ponto, o gás resultante do processo estaria com quantidade de CO_2 próxima às normalmente desejadas em unidades de produção em alto mar.

Em um cenário em que não se queira especificar o CO_2 em níveis tão baixos, o processo de remoção utilizando tecnologia de separação supersônica se torna ainda mais atraente, pois as condições necessárias seriam atingidas mais facilmente.

5. CONCLUSÃO

As simulações conduzidas indicam que é possível reproduzir a onda de choque, obtida em outro trabalho, com a modelagem e métodos numéricos adotados, sendo que a consideração de escoamento invíscido levou à obtenção da onda de choque na posição esperada. O uso de modelo de turbulência deslocou a onda de choque para montante da posição obtida para escoamento invíscido. As simulações de escoamento de gás com alto teor de CO_2 indicam que o gás atinge condições de pressão e temperatura dentro do separador supersônico capazes de promover a separação e obtenção de gás tratado com baixo teor de CO_2 .

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - Brasil) e à Petrobras pelo apoio associado ao investimento de recursos oriundos da Cláusula de P,D&I, constante nos contratos de exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural.

7. REFERÊNCIAS

- ARINA, R. Numerical simulation of near-critical fluids. *Applied Numerical Mathematics*, p. 409 – 426, 2004.
- OKIMOTO, F.; BROUWER, J. M. Supersonic gas conditioning. Em *World Oil*, volume 223, p. 89, 2002.
- TANNEHILL, J. C.; ANDERSON, D. A.; PLATCHER, R. H. *Computational fluid mechanics and heat transfer*. Taylor Francis, Washington, USA, second edição, 1997.
- YANG, Y.; WEN, C.; WANG, S.; FENG, Y. Theoretical and numerical analysis on pressure recovery of supersonic separators for natural gas dehydration. *Appl. Energy*, 132, 248 – 253, 2014.