OTIMIZAÇÃO DE UM BOCAL CONVERGENTE-DIVERGENTE PARA MAIOR EXPANSÃO DE UM GÁS EM ESCOAMENTO SUPERSÔNICO

W. R. S. CRUZ, F. P. SANTOS e R. A. MEDRONHO¹

Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química,
Programa de Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos
E-mail para contato: wenna@eq.ufrj.br

RESUMO – A proposta deste trabalho foi de alcançar um menor valor de pressão dentro de um bocal convergente-divergente, através da modificação da geometria do bocal, sem aumentar sua queda de pressão. O estudo foi realizado através de simulação CFD com o software FLUENT acoplado ao software de otimização DAKOTA. O algoritmo de otimização empregado foi o DIRECT. Inicialmente, partiu-se de uma geometria assumindo 16% de queda de pressão entre entrada e saída, onde atingia-se uma redução de pressão no interior do equipamento de 70%, em relação à pressão de entrada. A solução otimizada alcançou, para os mesmos 16% de queda de pressão, uma redução de pressão interna de 80% da pressão na entrada.

1. INTRODUÇÃO

Os separadores supersônicos de gás são equipamentos que promovem o abaixamento das condições de pressão e temperatura do fluido, acelerando-o até velocidades supersônicas dentro de um bocal convergente-divergente. A eficiência desses equipamentos está ligada à combinação das propriedades de resfriamento dos bocais convergentes-divergentes com os princípios da separação centrífuga (Haghighi et al., 2015). Termodinamicamente, trata-se da combinação de um turbo-expansor, com um separador ciclônico e um compressor para recompressão do gás (Brouwer *et al.*, 2004). O emprego desses equipamentos para desidratação do gás natural e remoção de hidrocarbonetos líquidos já têm sido discutidos, por exemplo, por Alferov *et al.*, 2014; Shooshtari *et al.*, 2013; Wen *et al.*, 2011; embora, poucos detalhes sobre a construção e o funcionamento tenham sido abordados.

Um projeto conhecido, descrito em Hirsch, 1988, *apud* Arina, 2004, apresenta um bocal convergente-divergente sob escoamento de ar operando com pressão na entrada e na saída de $1,0 \times 10^5$ Pa e $8,3 \times 10^4$ Pa, respectivamente, onde, a diminuição da pressão do ar atingiu o valor de 3×10^4 Pa até a posição da onda de choque, ou seja, uma redução de 70% em relação à pressão de entrada.

Haghighi (2010) otimizou a geometria de um bocal de modo a atingir uma queda de 95% do valor da pressão de entrada. Os autores, que trabalharam com uma pressão de entrada de $3,45 \times 10^5$ Pa, operaram com uma queda de pressão de 60%.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi avaliar mudanças geométricas que possam minimizar a pressão mínima do fluido dentro do bocal, mantendo constante a queda de pressão produzida. A análise do escoamento foi realizada por fluidodinâmica computacional (CFD), e o algoritmo de otimização empregado foi o Division of RECTangles (DIRECT).

2. METODOLOGIA

2.1. Construção da Geometria e Geração da Malha da simulação CFD

Para a diminuição do esforço computacional, a geometria do bocal foi simplificada para 2 dimensões e considerada axissimétrica. O contorno curvilíneo da parede externa do bocal foi construído segundo descrito por Arina (2004).

A malha foi então construída no software comercial POINTWISE® dividindo o espaço ao longo do comprimento em 200 tamanhos iguais, e a altura com 30 divisões que iniciava com o tamanho 0,005 crescendo numa razão 1,2. A Figura 1 apresenta a geometria completa do bocal inicial e malha inicial desse estudo.

Figura 1 - Geometria e Malha em condição inicial.

2.2. Simulação CFD

O software comercial CFD FLUENT v18.2 foi utilizado para resolver as equações governantes com as condições de contorno. A solução numérica foi calculada pelo acoplamento pressão-velocidade, com método de solução SIMPLE e discretização Upwind de primeira ordem para obter uma solução aproximada. Foram especificados os critérios de convergência de 10^{-6} para os resíduos das equações de continuidade e movimento e 10^{-9} para a equação de energia.

2.3. Processo de Otimização

O software utilizado para otimização foi o DAKOTA®, que tem em sua biblioteca implementado o algoritmo DIRECT.

Ao inicializar o processo, o otimizador calcula os pontos do domínio que devem ser analisados e alimenta o software de simulação, que emite a solução e o realimenta para

análise da otimização. Esse processo cíclico se repete até a convergência da solução otimizada.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi desenvolvida a otimização do bocal supersônico com o objetivo de minimizar a pressão experimentada pelo fluido durante o escoamento. Num contexto mais amplo, esse objetivo teve a intenção de representar, de modo simplificado, o objetivo da maximização da condensação de contaminantes ou o aumento da eficiência de um equipamento a uma dada condição de pressão de operação na entrada do bocal (P_o).

Todo o processo de otimização até a solução ótima gerou 117 avaliações para 7 iterações do método DIRECT. Uma média de aproximadamente 16 simulações avaliadas para cada iteração do método. O tempo total de otimização foi próximo a 80 minutos. O resultado encontrou um bocal com áreas de entrada e saídas maiores que as iniciais, porém, com o tamanho de garganta igual ao tamanho inicial, como pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 – Valor das variáveis no ponto ótimo.

Método	Division RECTangles			
	Entrada	Garganta	Saída	X-garganta
Variáveis [cm]	y1	y2	y3	x1
Ponto inicial	0,89	0,56	0,69	5,0
Limite inferior	0,89	0,1	0,69	1,0
PONTO ÓTIMO	0,98	0,56	1,19	3,2
Limite superior	1,5	0,59	1,5	9,0

É importante observar que os valores de todas as variáveis no ponto ótimo ficaram dentro dos limites impostos como restrições do domínio. E vale ressaltar que, do ponto de vista teórico, é perfeitamente coerente o tamanho da garganta ter permanecido com o mesmo valor, uma vez que o sistema manteve a mesma diferença de pressão entre a entrada e a saída do equipamento. A Figura 2 apresenta a comparação entre os perfis de pressão da solução inicial e da solução otimizada. As pressões mínimas obtidas foram $3,00 \times 10^4$ Pa (70% de P_o) e 2,01 Pa (cerca de 80% de P_o), respectivamente.

4. CONCLUSÕES

Mantendo-se a queda de pressão constante, foi possível estudar a melhor configuração do bocal de modo a apresentar uma melhor eficiência demonstrada a partir da análise do menor valor de pressão alcançada no interior do equipamento (80% da pressão de entrada). O emprego do algoritmo DIRECT foi uma boa escolha para o desenvolvimento deste estudo, pois alcançou a solução ótima de maneira eficiente com 7 iterações em 117 avaliações.

Figure 2 - Comparação dos perfis de pressão no interior dos bocais convergentes-divergentes das configurações geométricas inicial e ótima.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à ANP (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - Brasil) e à Petrobras pela bolsa de doutorado associada ao investimento de recursos oriundos das Cláusulas de P,D&I, constante nos contratos de exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural.

6. REFERÊNCIAS

- ALFYOROV, V., BAGIROV, L., DMITRIEV, L., IMAYEV, S. Gas liquefaction and separation device utilizing subsonic and supersonic nozzles, US 8696793 B2 – *patent*, 2014.
- ARINA, R., 2004. Numerical simulation of near-critical fluids. *Appl. Numer. Math.* 51 v. 4, p. 409-426, 2004.
- BROUWER, J. M., BAKKER, G. VERSCHOOF, H., EPSOM, H. D. Supersonic Gas Conditioning First Commercial Offshore Experience. Gas Proc. Assoc. Europe, UK, London, 2004.
- HAGHIGHI, M., HAWBOLDT, K.A., ABDI, M.A. Natural gas dehydration using supersonic separators with a novel design. In: Offshore Technology Conference, Houston, TX, USA, 2013.
- SHOOSHTARI, S. H. R; SHAHSAVAND, A. Reliable prediction of condensation rates for purification of natural gas via supersonic separators. *Separation and Purification Technology*, v. 116, p. 458—470, 2013.
- WEN, C., CAO, X., YANG, Y., ZHANG, J. Effects of swirls on natural gas flow in supersonic separators. In: Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, 2011.