

Avaliação do desempenho de compressores centrífugos com injeção de água¹

Laura Zanetti²
Rubem da Cunha Reis³
Lea Soledar⁴
Ana Sueli Almeida⁵

Resumo

O monitoramento do desempenho de equipamentos na indústria é essencial para identificar melhorias e garantir a confiabilidade de processos. Para tanto, são necessários métodos robustos de acompanhamento que possam permitir uma análise preditiva. O presente estudo tem o objetivo de monitorar o desempenho de compressores centrífugos, inseridos em uma indústria petroquímica, em um sistema não encontrado em literaturas tradicionais: compressão com injeção de água diretamente em contato com o gás de processo. A análise foi realizada com três diferentes metodologias: razão de compressão, *Mfactor* e eficiência politrópica modificada. Através da eficiência politrópica, com a temperatura de descarga corrigida, é possível antecipar a queda de desempenho, seis meses antes, com relação à razão de compressão e, conseqüentemente, mensurar o consumo energético da máquina.

Palavras-chave: Compressores centrífugos. Desempenho. Injeção de água.

Abstract

*Monitoring the performance of the equipment in industry is essential to identify improvements and to guarantee the reliability of the processes. For this purpose, robust follow-up methods are required to a predictive analysis. The present study has the objective of monitoring the performance of centrifugal compressors within a petrochemical industry, in a system not found in the traditional literature: compression with water injection in direct contact with the process gas. The analysis was made through three different methodologies: compression ratio, *Mfactor* and polytropic efficiency. By the polytropic efficiency with the corrected discharge temperature, it is possible to anticipate the drop of performance six months before, by the compression rate and, consequently, measure the energy consumption of the machine.*

Keywords: Centrifugal compressors. Performance. Water injection.

¹ Dissertação de conclusão de curso de engenharia química na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS), Porto Alegre, RS, Brasil, defendida em 05/12/2016, sob orientação de Rubem Reis, Lea Soledar e Ana Sueli Almeida.

² Acadêmica de engenharia química da PUCRS e estagiária em engenharia de processos na empresa petroquímica Braskem, Triunfo, RS. E-mail: laura.zanetti@acad.pucrs.br

³ Professor e mestre em engenharia química pela PUCRS. E-mail: rreis@pucrs.br

⁴ Engenheira química na Braskem e mestre em engenharia química pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). E-mail: lea.santos@braskem.com

⁵ Engenheira química na Braskem e mestre em engenharia química pela UFRGS. E-mail: anasueli.almeida@braskem.com

1 Introdução

Os compressores são equipamentos de extrema importância em uma ampla gama de setores industriais e têm a finalidade de proporcionar um incremento de pressão em gases e vapores, cujo funcionamento, requer consumo de energia. A energia requerida para essa operação pode ser fornecida por sistemas elétricos ou sistemas turbo compressores, acionados pela conversão da energia cinética de vapores (VAN WYLEN, 2009).

Mensurar a eficiência das máquinas e monitorá-las, através de curvas de operação, é essencial na área de engenharia de processos, a qual visa o acompanhamento e a otimização industrial. Os relatórios de acompanhamento de processos têm o intuito de verificar se as variáveis operacionais estão próximas às condições de projeto ou às de operação recomendadas, garantindo a segurança e a confiabilidade do processo. O desempenho das máquinas indica seus níveis de consumo energético, resultando no custo de operação, fator que confere ou não competitividade às empresas. Com o cenário consolidado, viabilizam-se as oportunidades de melhoria e, a partir delas, são realizados planos de ação e projetos de engenharia.

No presente estudo, tem-se o objetivo de avaliar o desempenho de compressores centrífugos, em uma indústria petroquímica, cuja matéria-prima é a nafta, onde o fluido de trabalho é composto majoritariamente por frações de hidrocarbonetos leves como: metano, etano, eteno, propano, propeno, propadieno, butano, butadieno e isopreno. Contudo, o fluido de trabalho também possui traços de frações pesadas como: hexeno, tolueno, benzeno e o-xileno. Além disso, possui teor de umidade, devido à tecnologia de craqueamento térmico (pirólise). O sistema avaliado possui uma grande diferença em relação aos sistemas típicos de compressão: a injeção de água líquida na carcaça e de um solvente na sucção, com alto ponto final de ebulição, conhecido no mercado como *wash oil*.

Ambas as injeções são realizadas na fase líquida, em proporções descobertas experimentalmente, ou seja, heurísticas. Essa prática é largamente utilizada em indústrias petroquímicas preocupadas com o desencadeamento de reações de polimerização no interior das máquinas.

A elaboração deste estudo foi motivada pela necessidade de mensurar a eficiência dos compressores em um sistema com injeção de água na carcaça, pois não se encontrou estudos sobre esse sistema na literatura científica nacional, tampouco em artigos publicados em revistas internacionais. Portanto, o objetivo deste estudo é o de avaliar os métodos de monitoramento do desempenho de cada estágio de compressão no âmbito da engenharia química, com o intuito de obterem-se registros que evidenciem, com antecipação, os desvios na dinâmica e na operação do sistema. Além disso, tem-se como objetivo secundário mensurar o consumo energético para avaliar a eficiência de operação, possibilitando a identificação de melhorias de processo.

2 Fundamentação teórica

2.1 Indústria petroquímica de primeira geração

As indústrias de primeira geração, também denominadas unidade de insumos básicos, fornecem majoritariamente eteno e propeno às indústrias de segunda geração, as quais transformam esses componentes em resinas plásticas. As tecnologias de conversão variam de acordo com a matéria-prima, que pode ser gás natural (etano e propano) ou nafta, proveniente de uma refinaria de petróleo. O craqueamento de nafta é um processo mais complexo, pois envolve a separação de outros componentes com valor comercial para complexos petroquímicos (MOULIJN, 2001).

2.2 Princípios de compressores

Compressores são máquinas geradoras, destinadas a aumentar a energia utilizável dos fluidos, através do aumento de pressão. Os compressores têm a função de impelir ao fluido a

energia necessária, para que seja possível aumentar a pressão de sucção (P_1) até uma pressão de descarga (P_2). O processo de compressão centrífuga se fundamenta na transformação de energia cinética em energia potencial, num processo em que o gás succionado é acelerado pelo rotor e, no qual ocorrem perdas de energia por atrito. A energia requerida para compressão é denominada *head*, cujo valor é expresso na forma de pressão ou de energia específica (energia por unidade de massa) (BLOCK, 1996).

Os princípios de concepção de compressores de uso industrial são: volumétrico e dinâmico. Na compressão volumétrica, o aumento do *head* implica em diminuição do volume do gás, pois, nesse tipo de processo, o gás admitido na sucção é fechado e comprimido. E, então, a câmara se abre novamente e, assim, sucessivamente, em um processo intermitente (RODRIGUES, 1991).

2.3 Efeitos da formação de polímeros no interior do compressor

Com o depósito de polímeros no interior do compressor, as perdas por atrito, durante a transformação da energia cinética em energia potencial, são maiores. O fluxo promovido através do rotor é dificultado, e cria-se resistência ao escoamento, conforme pode ser observado na figura 1, diminuindo-se sua turbulência e, conseqüentemente, sua velocidade (SNIDER, 2006). Sem os depósitos de polímeros no interior do compressor, o gás possui maior velocidade de escoamento, portanto, maior turbulência, conforme a figura 1, no esquema localizado à esquerda. Ao ocorrer a deposição polimérica, tem-se a redução da velocidade do gás, em função da maior perda de carga no escoamento, resultando em menor turbulência, conforme o esquema localizado à direita da figura 1. Logo, o maior gasto será energético do compressor para promover o mesmo *head* ao fluido de trabalho.

A polimerização consiste na ligação entre monômeros, formando longas cadeias, as quais são denominadas polímeros. Os mecanismos podem ser classificados em adição e

condensação (NICHOLSON, 1997). O mecanismo de polimerização, mais comum em compressores inseridos em indústrias petroquímicas, produtoras de eteno e propeno, é o de polimerização por adição (SNIDER, 2006).

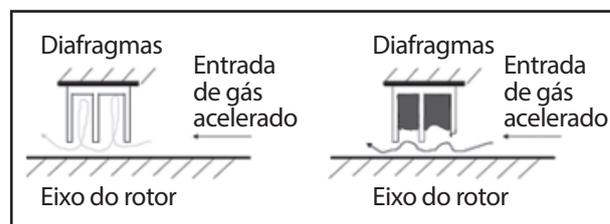


Figura 1 - Depósito de polímeros e turbulência do escoamento
Fonte: Snider (2006).

A polimerização por adição acontece, através de moléculas com ligações duplas e de forma mais acentuada em compostos com duas ligações duplas como, por exemplo: butadieno, isopreno, vinil-acetileno e estireno. O mecanismo começa ao se formar um radical livre, através da quebra da ligação dupla, quando a molécula é exposta ao calor (etapa de iniciação), a qual se liga a outros monômeros e disponibiliza novamente um radical livre que segue nas reações de polimerização (propagação). A molécula aumenta o peso molecular até se tornar insolúvel no gás de processo (terminação). As etapas de polimerização são ilustradas na figura 2 (NICHOLSON, 1997).

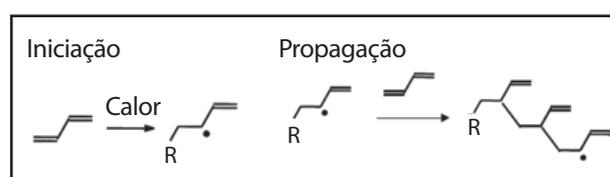


Figura 2 - Etapas de polimerização
Fonte: Snider (2006).

A reação de polimerização é esperada, pois estão presentes na composição do gás, moléculas com ligações duplas, entre as quais as de butadieno e isopreno; outro fator que propicia a polimerização são as temperaturas do sistema. São conhecidas três ações para controlar a sujidade no interior de máquinas, inseridas em indústrias produtoras de eteno: injeção de água, solvente com alto ponto final de ebulição (*wash*

oil) e produtos químicos inibidores de polimerização (SNIDER, 2006).

A injeção de água direta na carcaça dos compressores é uma metodologia preventiva à formação de sujidades, reduzindo-se, assim, a temperatura para deixar o meio menos propício ao desencadeamento de reações de polimerização. É realizada, através da aspersão de água líquida na carcaça, diretamente em contato com o gás de carga. Deve-se ter cuidado ao realizar esse procedimento, pois ele pode causar erosão, especialmente se a água contiver alto teor de sais minerais. A vazão recomendada obedece aos padrões de experimentos empíricos, realizados ao longo dos anos pelas indústrias petroquímicas (SNIDER, 2006).

A injeção de *wash oil*, na sucção dos estágios de compressão, é uma medida paliativa e é utilizada para dissolver polímeros, já formados em seu interior. O óleo deve ter alto ponto final de ebulição e também alto teor de aromáticos, para evitar sua vaporização no interior do

equipamento. As quantidades de injeção são heurísticas e garantem a não ocorrência de danos, no interior da máquina, causados por martelos hidráulicos ou níveis não permitidos de vibração (SNIDER, 2006).

O depósito de polímeros, no interior da máquina, se reflete na perda de eficiência e maior custo operacional. Em situações críticas, em que o funcionamento da turbina já está limitado, pode-se chegar a situações de redução da capacidade ou, ainda, comprometer a segurança do processo. É de extrema importância o acompanhamento do desempenho das máquinas, a fim de possibilitar que se tomem medidas preventivas, e ainda, gerar a oportunidade de otimizar os processos.

2.4 Sistema em avaliação

O sistema em avaliação consiste de uma turbina acoplada a cinco estágios de compressão, conforme esquema da figura 3. A turbina é acionada pela energia cedida por vapor superaquecido para as pás dos rotores (BRUM, 2016).

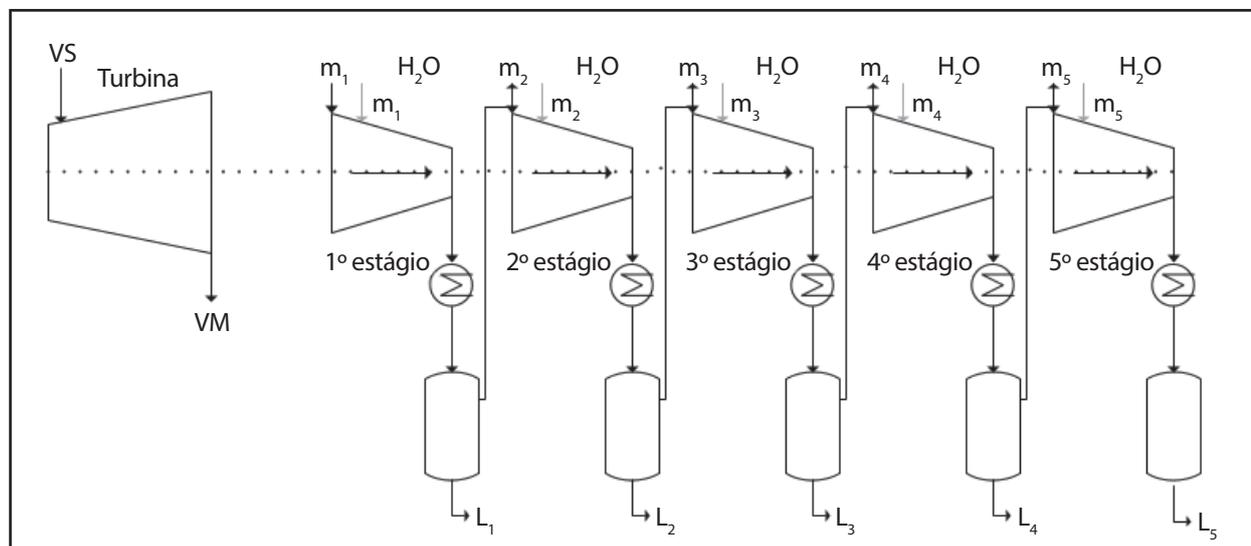


Figura 3 – Sistema de compressão em estudo
Fonte: Os autores (2016).

Os cinco estágios de compressão, isolados, estão acoplados no mesmo eixo e a alimentação de cada estágio é gás de processo, contendo mais de vinte componentes, cuja composição majoritária é formada por eteno, metano e propeno. Porém,

possui quantidades significativas de compostos pesados e é justamente esse o propósito desse sistema: remover as moléculas pesadas (BRUM, 2016) que tendem a promover o depósito de polímeros no compressor, reduzindo assim sua eficiência.

A injeção de água na sucção de cada estágio de compressão é um método não tradicional para resfriamento, durante a compressão, e é uma medida preventiva, para tornar o meio menos propício a polimerizações. Realizada a injeção de água, reduz-se a temperatura na descarga, mascarando-se o limite de compressibilidade térmica do fluido, em consequência disso, obtêm-se valores de eficiência surreais, porque o incremento de temperatura, na verdade, é superior às medições dos instrumentos, ou seja, deve-se ao contato da água e não ao processo de compressão (BRUM, 2016).

A presença de água na mistura afeta sensivelmente os parâmetros termodinâmicos de modelagem e também a definição de propriedades, afinal, têm-se moléculas polares de água, em meio à mistura de hidrocarbonetos gasosos (compostos apolares). A mensuração da eficiência nessas condições não é descrita na literatura direcionada a máquinas compressivas, mas é possível obter seus efeitos, através da aplicação das leis termodinâmicas e essa será a grande contribuição do presente estudo.

3 Metodologia

A avaliação do sistema turbocompressor requer um balanço exegético, devido à geração de entropia, porém, mensurar entropias unitárias em um sistema multicomponentes exige alto esforço para geração de registros, uma vez que a obtenção de dados termodinâmicos exige diversas simulações no programa *Aspen Plus*. Além disso, esse método forneceria um cálculo pontual e não poderia ser representado na forma de *trend*, o qual é um dos objetivos-chave deste estudo. No âmbito da engenharia química, foram selecionados três principais métodos de monitoramento do volume de controle escolhido: razão de compressão, *Mfactor* e eficiência politrópica.

No presente estudo, tem-se o intuito de avaliar o método existente e otimizá-lo, a fim de se obter, no acompanhamento de processo, registros que possuam variáveis com significado físico e comportamento preditivo, para que se

tenha a possibilidade de agir preventivamente sobre a queda no desempenho e não de modo paliativo. O monitoramento industrial atual, utilizado para o volume de controle de um estágio de compressão, acompanha somente as pressões de sucção e de descarga. A metodologia aplicada é denominada razão de compressão, a qual consiste na relação das pressões, equação 1.

$$RC = \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

A razão de compressão fornece um número adimensional que, em teoria, deve permanecer constante, pois a energia fornecida pela máquina ao fluido, em condições ideais, não varia. No entanto, ao longo do tempo, observam-se pequenas quedas nessa relação, representando a perda de eficiência do sistema, o que requer mais energia para ter o mesmo incremento de pressão (*head*).

O *Mfactor* é uma metodologia utilizada pela Nalco Water (2016) e corresponde ao denominador da eficiência politrópica (equação 15). A empresa, em conjunto com as petroquímicas, utiliza o *Mfactor* para diagnosticar a formação de polímeros no interior dos compressores, pois esse método apresenta maior abrangência na análise do que a razão de compressão: considera, além das pressões, durante o processo de compressão, pois utiliza também as temperaturas, conforme equação 2. Contudo, não considera efeitos de composição do gás.

$$Mfactor = \frac{L_n \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}{L_n \left(\frac{P_2}{P_1} \right)} \quad (2)$$

Onde T_1 e P_1 são as condições de sucção da máquina e T_2 e P_2 referem-se a descarga. A equação *Mfactor* é igual ao denominador da equação da eficiência politrópica (equação 12) a qual será discutida a seguir. Nesse método, considera-se os efeitos de pressão e temperatura da compressão. Contudo, ainda não se tem um

termo na equação que represente a composição do gás. Os valores a serem inseridos no cálculo devem ser absolutos, tanto os das temperaturas quanto os das pressões. Esse fator é utilizado a décadas no diagnóstico e, empiricamente, sabe-se que um incremento de 0,015 corresponde ao início de reações de polimerização, ou seja, depósito de sujidades. E, para comprovar a sua metodologia, a empresa realiza, do ponto de vista mecânico do equipamento, a análise de vibração, a qual sofre um incremento, se houver partículas de polímeros depositadas. A figura 7 ilustra o comportamento do *Mfactor*, juntamente com a vibração, para evidenciar as heurísticas, observadas ao longo dos anos.

Contudo, esse método ainda fornece valores adimensionais que representam o comportamento quanto à formação de sujidades e não resulta em valores com significado físico. O método mais recomendado para o monitoramento de compressores centrífugos é a eficiência politrópica, pois essa eficiência abrange as informações de equilíbrio, pressões, temperaturas e sua composição (SNIDER, 2006). Porém é uma metodologia complexa, pois se deseja modelar um sistema de compressão, não encontrado em literaturas tradicionais: compressão com injeção de água na carcaça, diretamente em contato com o gás de processo.

A eficiência politrópica, com injeção de água na carcaça, requer ajustes termodinâmicos. Para tanto, é necessário abordar a termodinâmica aplicada a processos de compressão. A energia é expressa, através da variação de propriedades extensivas e sua conservação, em um volume de controle específico, define a energia interna como uma propriedade de estado.

O gás, sendo comprimido por um êmbolo, é considerado um sistema fechado e sua energia interna sofre variações com o calor e trabalho trocados, durante o processo. Quando a máquina é utilizada para forçar o escoamento do gás, desde um nível inferior de pressão até um superior, o volume de controle considerado abrange as fronteiras de entradas e saídas de massa (KYLE, 2001).

Considerando-se que o calor e o trabalho são trocados a taxas constantes, vazão mássica constante, ao longo do escoamento e propriedades do fluido invariáveis no tempo, tem-se a conservação da energia no volume de controle.

A definição de entalpia é expressa na equação (3) e sua variação constitui o balanço energético, considerando-se o calor e o trabalho, dentro do volume de controle, conforme a equação 4:

$$H = U + PV \quad (3)$$

$$-w + q = h_2 - h_1 \quad (4)$$

Na prática, têm-se a dissipação de energia, e os efeitos, relacionados ao atrito viscoso e ao turbilhonamento, promovem a conversão de parte de transporte de massa em energia interna.

A relação entre os calores específicos a volume e pressão constantes, representados respectivamente por C_v e C_p , para gases ideais, é dada pela equação 5 e está relacionada com a constante universal dos gases perfeitos, R . O calor específico à pressão constante é função da temperatura, conforme a equação 6.

$$C_p - C_v = R \quad (5)$$

$$C_p = a + bT^2 + cT^3 \quad (6)$$

O calor específico sob volume constante, C_v , não é usualmente tabelado. A razão entre os calores fornece o expoente adiabático (k), dado pela equação 7.

$$k = \frac{C_p}{C_v} \quad (7)$$

Esse expoente é função da temperatura e da composição do gás do qual se deseja mensurar as propriedades. Admite-se que a proporção entre as taxas de trabalho e calor, ao longo da compressão, é constante, conforme na equação 8. Têm-se constante o produto entre pressão e volume elevados ao expoente politrópico, conforme evidenciado na equação 9, através de deduções matemáticas, obtêm-se uma correlação entre os expoentes politrópicos e isoentrópicos, através de um fator F , de acordo com a equação 10.

$$F = \frac{dq}{dW} = T \frac{dS}{P dV} \quad (8)$$

$$PV^n = \text{constate} \quad (9)$$

$$n = k - F(k - 1) \quad (10)$$

A eficiência de compressão para processos reais é dada pela eficiência politrópica, a qual considera variações na entropia. O trabalho cedido ao fluido, durante o processo de compressão é, na realidade, maior que o calculado, devido à desordem do sistema. Para relacionar o *head* ideal e o real, é definida uma eficiência politrópica de compressão, equação 11.

$$\eta_p = \frac{H_p \times m}{Pot_{Turbina}} \quad (11)$$

O processo em questão não realiza trocas térmicas com o ambiente, assim, pode ser considerado adiabático e, para tanto, têm-se a equação 12. Ela evidencia a eficiência politrópica, através do expoente isoentrópico (k) e politrópico (n),

$$\eta_p = \frac{\frac{k-1}{k}}{\frac{n-1}{n}} \quad (12)$$

onde o denominador da eficiência politrópica é expresso na equação 13:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\text{Ln} \left(\frac{T_2}{T_1} \right)}{\text{Ln} \left(\frac{P_2}{P_1} \right)} \quad (13)$$

O expoente isentrópico para uma pressão constante varia sensivelmente com a temperatura e com a composição. Por essa razão, traçou-se, no simulador de processos *Aspen Plus*, um perfil de valores de k , para uma faixa de temperaturas, de acordo com as proporções da composição do gás. Ao se inserir os parâmetros no simulador para obter as curvas, é necessário escolher o modelo termodinâmico a ser utilizado. São recomendados quatro modelos para

plantas produtoras de eteno, a partir de nafta: Peng-Robinson, Soave-Redlich-Kwong, Chao-Sea e Grayson.

As propriedades termodinâmicas intensivas podem ser quantificadas experimentalmente — pressão, temperatura, volume e concentração — e são definidas, a partir de modelos termodinâmicos, cujo objetivo é obter uma equação de estado que ajuste, da melhor forma, os dados reais, tendo ou não fundamentações físicas em sua justificativa, com a possibilidade de os parâmetros correspondentes serem ajustados numericamente. Na literatura, existe uma ampla gama de equações analíticas, tornando-se impraticável testar todos os modelos. Felizmente, são conhecidas algumas diretrizes que podem auxiliar na escolha de uma delas, de acordo com a origem molecular do comportamento macroscópico das propriedades (KORETSKY, 2007).

A modelagem de Peng-Robinson é indicada para misturas com componentes apolares e gases leves: hidrocarbonetos, dióxido de carbono, sulfato de hidrogênio e hidrogênio. É utilizada para processos, em que há altas pressões e temperaturas, recomendada especialmente para processamento de hidrocarbonetos e extrações supercríticas (PENG; ROBINSON, 1976).

As propriedades definidas por Soave-Redlich-Kwong têm como base as equações cúbicas de estado e são recomendadas preferencialmente para misturas apolares ou suavemente polares. É um método adequado para faixas de baixa até alta pressão, temperaturas e, ainda, é consistente em regiões críticas. Portanto, do mesmo modo que o modelo de Soave-Redlich-Kwong pode ser utilizado em processamento de hidrocarbonetos e extrações supercríticas (REDLICH; KWONG, 1949).

O método para determinação das propriedades termodinâmicas de Chao-Sea foi desenvolvido para sistemas com hidrocarbonetos leves e pesados e não é recomendado para processos de alta pressão e nem para modelar sistemas próximos a condições críticas, pois, nesses

cenários, apresenta comportamentos anômalos. É utilizado em colunas de destilação a vácuo ou que operam em pressão atmosférica. Não é recomendado para misturas que contenham hidrogênio (CHAO; SEADER, 1961).

O modelo termodinâmico de Grayson é utilizado, principalmente em processos produtores de eteno e propeno e é recomendado para faixas operacionais de 60° F a 800° F e pressões menores que 3.000 psia. Em sua modelagem, contempla as propriedades do hidrogênio, por essa razão, é mais recomendado do que o Chao-Sea para gases com teor de hidrogênio (GRAYSON; STREED, 1963).

O método escolhido para modelagem termodinâmica da relação entre os calores específicos da mistura, para o presente estudo, foi o de Grayson, devido a sua abrangência no número de componentes modelados, condições de pressão e temperatura dentro das faixas recomendadas e teor de hidrogênio no gás de processo. Definido o método, obtêm-se as curvas do expoente isentrópico, em função da temperatura, calculando-se, assim, um valor específico de k para cada valor de temperatura inserido, de acordo com a sua composição, considerando-se o teor de água.

As temperaturas inseridas na modelagem do expoente isoentrópico e politrópico, para a obtenção da eficiência politrópica, devem ser corrigidas para não mascarar os valores de eficiência energética. Quando o processo é resfriado, tem-se: $n < k$, com esse resultado, obtêm-se valores absolutos de eficiência superior a cem por cento, os quais não são representativos de um processo real.

As injeções de água têm a finalidade de realizar o resfriamento, durante a compressão e mascaram o limite térmico de compressibilidade térmica do fluido. É natural que, ao comprimir certo fluido, ele tenha um incremento de temperatura e, conseqüentemente, de entropia. Essa variação deve ser considerada no equacionamento da eficiência politrópica, quando esse incremento de temperatura se refere aos efeitos

da compressão. Logo, os efeitos de resfriamento devem ser isolados, para que se obtenham valores de eficiência energética com sentido físico. Ou seja, a temperatura de descarga de cada estágio de compressão deve ser corrigida para o valor que corresponde a sua temperatura real de descarga, sem a injeção de água. A água é aspergida em estado líquido na sucção e vaporiza-se, ao longo da carcaça do compressor, sua vazão corresponde a um por cento da vazão de gás de carga dos compressores.

A correção da temperatura de descarga é realizada, através de um balanço de energia e verificada, através da simulação de processo no programa *Aspen Plus*. O balanço energético é realizado para cada estágio de compressão para avaliar a influência do resfriamento. Assim, conhecida a redução de temperatura de descarga, devido à injeção de água na carcaça diretamente em contato com a mistura gasosa de hidrocarbonetos, acresce-se o valor absoluto de temperatura na temperatura de descarga.

A temperatura de descarga (T_2), referente a cada estágio de compressão, varia fortemente com a vazão de água injetada, e o volume de controle do balanço energético acontece, de acordo com o demonstrado na figura 4.

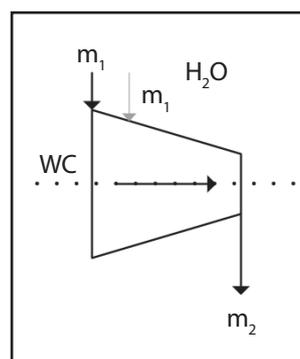


Figura 4 - Volume de controle com injeção de água
Fonte: Os autores (2016).

O equacionamento energético para a fronteira do volume de controle, considerando-se o processo adiabático, devido ao seu sistema de isolamento de alta tecnologia, é evidenciado na seguinte equação 14,

$$-w_c + q = m_1 h_1 + m_1^{H_2O} h_{H_2O} - m_2 h_2 \quad (14)$$

onde: $m_2 = m_1 + m_1^{H_2O}$ e $q = 0$.

Logo, substituindo-se m^2 tem-se a equação 15,

$$-w_c = m_1 h_1 + m_1^{H_2O} h_{H_2O} - (m_1 + m_{H_2O}) h_2 \quad (15)$$

evidenciando as massas, conforme equação 16.

$$-w_c = m_1 (h_1 - h_2) + m_1^{H_2O} (h_{H_2O} - h_2) \quad (16)$$

A variação da entalpia é dada pela equação 17.

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} c_p dT \quad (17)$$

Em decorrência disso, simplificando a equação 19, parte-se da premissa de variação linear para uma pequena faixa de temperaturas, e obtêm-se as equações 18 e 19,

$$\Delta H = \bar{c}_p \Delta T \quad (18)$$

$$\Delta H = \bar{c}_p (T_2^m - T_1) \quad (19)$$

onde: T_2^m é a temperatura de descarga modificada pelo resfriamento, devido ao contato direto da água com o gás de processo, e T_1 é a temperatura de sucção.

Conhecida a potência de eixo, fornecida pela extração do vapor superaquecido para a turbina, vazão de entrada de gás de processo, vazão de água injetada na carcaça, temperatura de sucção e calor específico, determinado no simulador de processos *Aspen Plus* para o sistema multicomponente e para um perfil de temperaturas, obtêm-se a temperatura de descarga, com os efeitos de resfriamento.

Nesse momento, é necessário avaliar o sistema como se ele fosse um sistema comum, onde não há o resfriamento com a injeção de água líquida na carcaça, conforme ilustrado na figura 5, para posteriormente extrapolar para o cenário real em avaliação, onde é possível mensurar de eficiência, pois, conforme discutido anteriormente, a injeção de água mascara o desempenho, já que não representa o limite de compressibilidade térmica do fluido e resulta em valores de eficiência superiores a cem por cento. Analisando-se o mesmo volume de

controle, porém, negligenciando-se a injeção de água líquida, tem-se um sistema tradicional de compressão. E, assim, é possível verificar qual seria a temperatura real de descarga do compressor, sem o resfriamento.

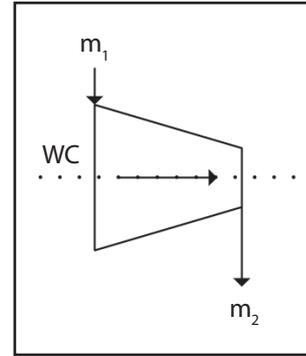


Figura 5 - Volume de controle de um sistema tradicional
Fonte: Os autores (2016).

O balanço de energia, para esse sistema, é expresso pela equação 20,

$$-w_c + q = m_1 h_1 - m_2 h_2 \quad (20)$$

onde: $m_2 = m_1$ e $q = 0$.

Dadas as igualdades mássicas e o sistema adiabático, obtêm-se a equação 21.

$$-w_c = m_1 (h_1 - h_2) \quad (21)$$

As entalpias são calculadas pelo mesmo método da compressão com água, equação 21, porém, em sua composição não se considera esse componente, conforme a equação 22,

$$\Delta H = \bar{c}_p (T_2^r - T_1) \quad (22)$$

onde: T_2^r é a temperatura de descarga real, ou seja, devido aos efeitos de compressão e não ao resfriamento que mascara a eficiência, e T_1 é a temperatura de sucção.

Para isolar os efeitos da injeção de água na eficiência politrópica, acresce-se, nos valores de temperatura de saída do compressor, mensurados e registrados no sistema digital de controle distribuído (SDCD). Ele registra todas as informações mensuradas pelos instrumentos de medição, a variação de temperatura calculada pelos balanços energéticos com e sem o resfriamento, de acordo com a equação 23.

$$T_2 = T_2^{SDCD} + (T_2^r - T_2^m) \quad (23)$$

O cálculo da eficiência politrópica é realizado, através da equação 12, onde a temperatura de descarga é a temperatura corrigida (equação 23), e o expoente isoentrópico é calculado para cada temperatura, corrigida pontualmente, conforme a equação 24, para o primeiro estágio de compressão.

No intuito de aumentar a confiabilidade dos cálculos, simulou-se o sistema no simulador de processos *Aspen Plus* para avaliar a temperatura de descarga real, porém, o programa não considera a injeção de água líquida na carcaça, pois, em teoria, o único tipo de fluido compatível com máquinas compressoras são os gases.

4 Resultados e discussões

4.1 Registros de acompanhamento de processos e suas vantagens

Conforme mencionado na metodologia, para avaliação do desempenho de compressão foram utilizados dois métodos com o intuito de prever, no monitoramento via registros: a razão de compressão e o *Mfactor*. Neste estudo, são ilustrados os resultados do primeiro estágio de compressão.

Com os dados medidos e registrados pelo sistema digital de controle, distribuído (SDCD) de pressões e temperaturas na descarga, foram aplicados os equacionamentos de razão de compressão (figura 6) e *Mfactor* (figura 7) para traçar os gráficos de registros do acompanhamento de processos. Na tentativa de comparar o desempenho atual à projetada, calculou-se o *Mfactor* pela mesma metodologia, porém, com as condições de projeto da folha de dados do equipamento, esses valores representam a linha de base do projeto, comumente conhecida como *baseline* em projetos de produtividade.

O período de janeiro de 2013 a agosto de 2013, sinalizado com um retângulo pontilhado cinza no registro da razão de compressão, evidencia o período em que a razão de compressão se manteve constante, revelando que a operação estava estável, porém, esse monitoramento é demasiadamente simplificado para antecipar desvios, devido ao seu sistema de controle. A metodologia do *Mfactor* aponta uma mudança de patamar de 0,015, no período, valor considerado início do desencadeamento das reações de polimerização nos interiores do compressor, requerendo, assim, maior energia.

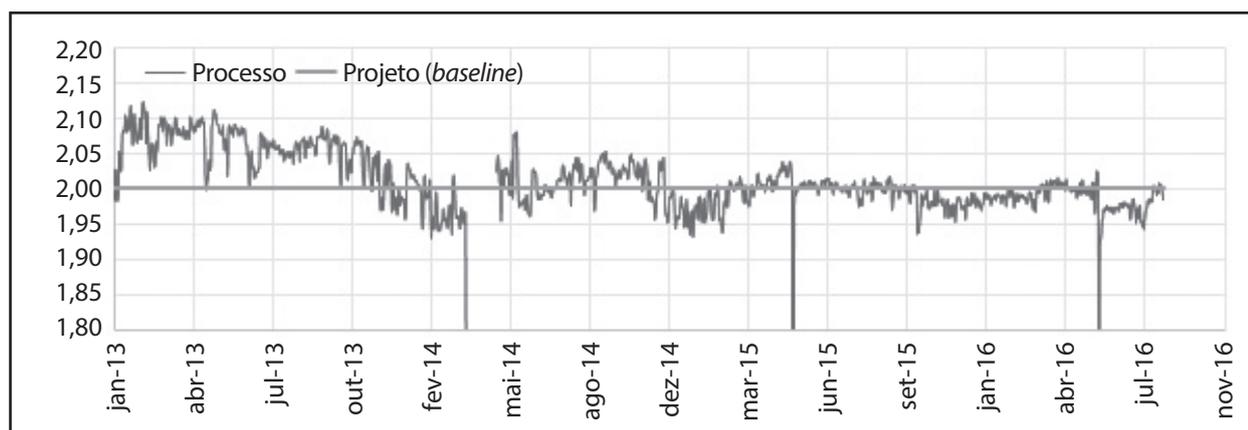


Figura 6 – Registro da razão de compressão
Fonte: Os autores (2016).

O *Mfactor* indica a antecipação desse fenômeno em um período superior a nove meses, antes da razão de compressão, adquirindo, assim, grande vantagem frente

ao método anterior, pois possibilita que as ações preventivas sejam adotadas a tempo de recuperar e não apenas compensar as perdas energéticas.

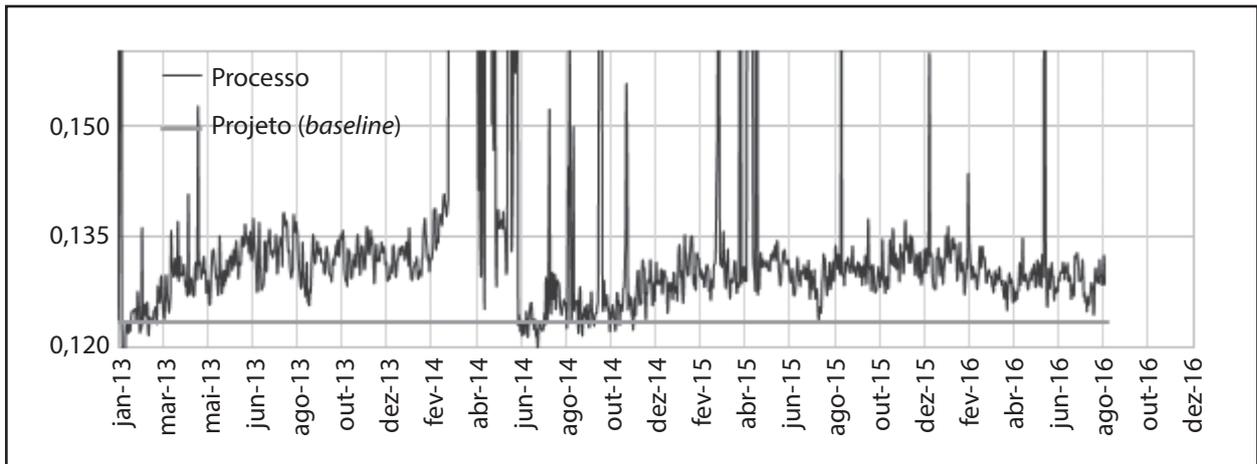


Figura 7 – Registro *Mfactor*
 Fonte: Os autores (2016).

Contudo, apesar de apresentar comportamento preditivo satisfatório, o *Mfactor* é um indicador adimensional, ou seja, sem significado físico. Também não fornece informações, quanto à eficiência energética de compressão e é de grande importância o conhecimento de seu consumo energético para determinar seu custo de operação e mensurar otimizações financeiramente. Para tanto, é necessário calcular a eficiência politrópica com correção da temperatura de descarga,

em função da injeção de água na carcaça para resfriamento.

Em primeiro lugar, para aplicar a equação da eficiência politrópica adiabática modelou-se, no simulador de processos *Aspen Plus*, o perfil do expoente isoentrópico (*k*), em função da composição da mistura. De posse dos resultados pontuais para cada temperatura, ajustou-se um polinômio que representa o perfil de *k* em função das temperaturas de descarga, conforme consta na figura 8.

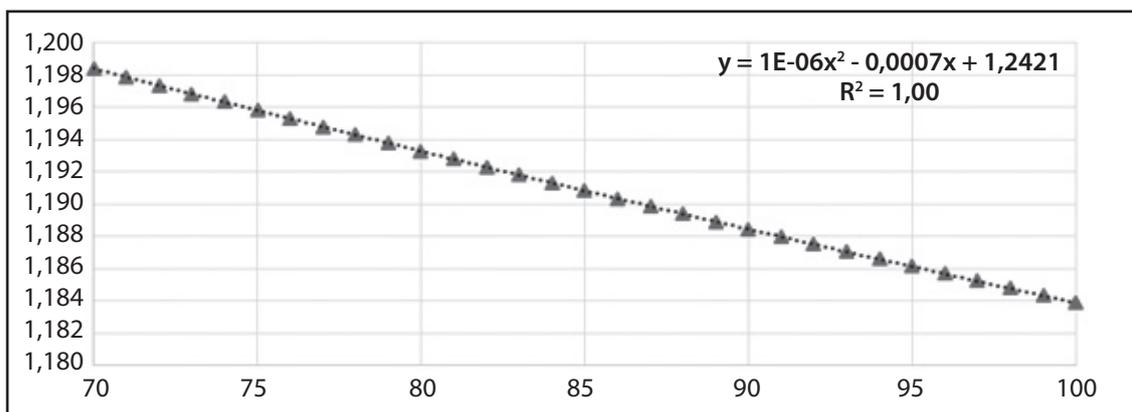


Figura 8 – Polinômio expoente isoentrópico
 Fonte: Os autores (2016).

Para cada temperatura de descarga corrigida, calcula-se o *k* correspondente a essa temperatura, de acordo com a equação 24.

$$k = 1E-06T^2 - 0,0007T + 1,2421 \quad (24)$$

A correção da temperatura de descarga é realizada, através do incremento de temperatura que se faz, considerando-se um sistema tradicional, ou seja, através do balanço de energia que considera a vazão

de água e desconsidera seus efeitos para modelar-se. E então, finalmente, calcula-se

a eficiência politrópica, representada, graficamente, na figura 9.

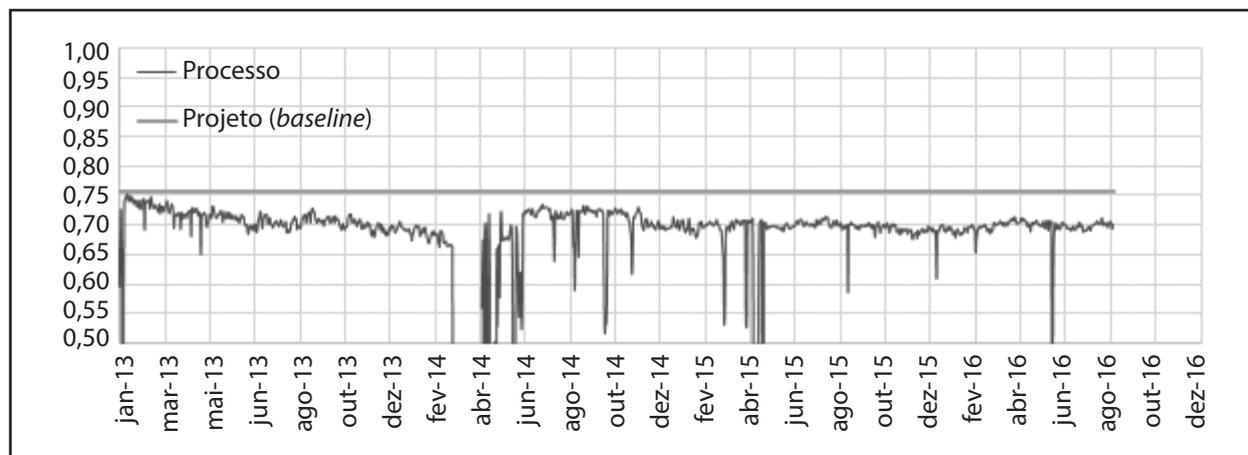


Figura 9 - Eficiência politrópica
Fonte: Os autores (2016).

A eficiência politrópica, com a correção de temperatura, possui valores com significado físico e entre faixas esperadas de operação, com valor médio de setenta e um por cento. Anteriormente, o resultado da eficiência politrópica era superior a cem por cento, como consequência da temperatura de descarga mensurada, a qual não era representativa do processo de compressão, e sim, devido à injeção de água líquida na carcaça de cada estágio do compressor. Em relação ao comportamento preditivo, possui o mesmo período de antecipação que a metodologia do *Mfactor*, porém, fornece valores que justificam e mensuram melhorias de processo, em função do seu consumo energético, ou seja, em função do consumo de vapor superaquecido na turbina (equipamento fornecedor da potência de eixo dos estágios de compressão).

Simulou-se o compressor no programa *Aspen Plus*, no modo *simulation*, no qual se inserem as condições de entrada e dados mecânicos do equipamento e têm-se, como resultado, suas condições de pressão e temperatura de saída, resultando em valores bem próximos aos resultados do balanço energético. A temperatura de descarga, resultante dessa simulação, é de 95,6 °C, e as temperaturas, corrigidas pelo

balanço energético, variam de acordo com a vazão de água entre 95 e 100 °C.

Os três métodos de acompanhamento são recomendados ao se construir um acompanhamento de processos, porém, cada um deles possui resultados com significados e predições diferentes, conforme discutido na seção 3. O ideal é compará-los aos valores de projeto e identificar melhorias, através de sua predição.

5 Conclusão

Tendo-se aplicado os equacionamentos adimensionais, propostos para avaliação do desempenho de compressores centrífugos, no âmbito da engenharia química, verificou-se que o *Mfactor* possui comportamento preditivo de indicação, referente ao depósito de polímeros, em torno de nove meses, antes da relação de compressão.

O método de cálculo da eficiência politrópica adiabática não tradicional, devido à injeção de água, requer correções para o expoente isoentrópico (k) e também para a temperatura de descarga. O expoente isoentrópico foi modelado termodinamicamente com as suas condições operacionais pelo modelo de Grayson e, a partir dele, traçaram-se perfis de temperatura.

A temperatura de descarga foi ajustada, através de um balanço energético, que considera o calor fornecido pelo gás de processo à água, com o intuito de encontrar a diferença entre a temperatura real e a modificada para acrescentá-la aos valores indicados pelo SDCD.

Realizadas as correções, foram obtidos valores de eficiência que, além de adquirirem comportamento preditivo, semelhante ao *Mfactor*, resultam em números com significado físico para mensurar custos de operação e os ganhos financeiros que possam ser alcançados, através de otimizações.

Como sugestão para futuros estudos, propõe-se a análise das quantidades de injeção de água, realizadas na carcaça da máquina diretamente em contato com o fluido e sua relação com as faixas de temperatura de operação que amenizem a vazão. Porém, garantem que a operação estará em patamares seguros, em relação ao desencadeamento de reações de polimerização da mistura.

Referências

- BLOCK, H. P. **A practical guide to compressor technology**. Nova York: McGraw-Hill, 1996. 518 p.
- BRUM, J. **Manual de operações da área 12**. Triunfo: Braskem, 2016. 125 p.
- CHAO, K. C.; SEADER, J. D. A general correlation of vapor-liquid equilibrium in hydrocarbon mixtures. **AIChE Journal**, v. 7, p. 598, 1961.
- GRAYSON, H. G.; STREED, C. W. Paper 20-PO7. In: WORLD PETROLEUM CONGRESS, 6., 1963, Frankfurt. **Proceedings...** Hamburg, 1963.
- KORETSKY, M. D. **Termodinâmica para engenharia química**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 502 p.
- KYLE, M. D. **Chemical and process thermodynamics**. 3th ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2001. 432 p.
- MOULIJN, J. A. **Chemical process technology**. 2th ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2001. 453 p.
- NALCO WATER. **História da empresa**. 2016. Disponível em: <<http://pta.nalco.com/la/aboutnalco/history.htm>>. Acesso em: 25 out. 2016.
- NICHOLSON, J. W. **The chemistry of polymers**. 2th ed. London: The Royal Society of Chemistry, 1997. 190 p.
- PENG, D. Y.; ROBINSON, D. B. A new two-constant equation-of-state. **Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 15, p. 59-64, 1976.
- REDLICH, O.; KWONG, J. N. S. On the thermodynamics of solutions .V. An equation of state. Fugacities of gaseous solutions. **Chemical Reviews**, v. 44, p. 223-244, 1949.
- RODRIGUES, P. S. **Compressores industriais**. Rio de Janeiro: EDC, 1991. 515 p.
- SNIDER, S. Ethylene plant cracker gas compressor fouling. In: ETHYLENE PRODUCERS' CONFERENCES, 2006, Orlando. **Proceedings...** Houston: Ethylene Producers' Committee, 2006.
- VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: Blucher, 2009. 659 p.

