

Proposição de um simulador para uma válvula reguladora de pressão em um sistema preventivo de blowout

Proposal of a simulator for a pressure regulating valve in a blowout preventer system

DOI:10.34117/bjdv8n4-008

Recebimento dos originais: 21/02/2022

Aceitação para publicação: 31/03/2022

Igor de Souza Pinto

Mestrando em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais
Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ

E-mail: igorsouzapinto@id.uff.br

Mariana Santos da Silva

Mestranda em Engenharia de Produção e Sistemas Computacionais
Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ

E-mail: santosmariana@id.uff.br

Gustavo Trindade Assayag

Graduando em Engenharia de Produção - Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ

E-mail: gustavo_assayag@id.uff.br

Luiz Antônio de Oliveira Chaves

Doutorando em Engenharia de Processos Químicos - Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ

E-mail: luizchaves@id.uff.br

Jamile Eleutério Delesposte

Doutoranda em Sistemas de Gestão Sustentáveis - Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, CEP: 24210-240 - Niterói - RJ

E-mail: jamile_delesposte@id.uff.br

Iara Tammela

Doutora em Engenharia de Produção - Departamento de Engenharia

Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ

E-mail: iaratammela@id.uff.br

Rodolfo Cardoso

Doutor em Engenharia de Produção - Departamento de Engenharia
Instituição: Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)
Endereço: Rua Recife s/n, CEP: 28895-532 - Rio das Ostras - RJ
E-mail: rodolfo_cardoso@id.uff.br

Danilo Colombo

Doutorando em Engenharia de Produção
Instituição: CENPES - PETROBRAS
Endereço: Av. Horácio Macedo 950, CEP: 21941-915 - Rio de Janeiro - RJ
E-mail: colombo.danilo@petrobras.com.br

* Esta é uma versão revisada do artigo: PINTO, I. S.; ASSAYAG, G. T.; DELESPOSTE, J. E.; CHAVES, A. O.; SILVA, M. S. Proposição de um simulador para uma válvula reguladora de pressão em um sistema preventivo de blowout. In: XXVIII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP), 2021, Bauru, SP. Ensino em Engenharia de Produção: como preparar as novas gerações para os desafios do século XXI. Bauru, SP: Editora da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2021. v. 1. p. 1-14.

RESUMO

O blowout preventer (bop) é uma barreira fundamental na segurança das operações de perfuração e completação de poços que requer a disponibilidade e a confiabilidade como fatores que devem ser gerenciados com eficiência. Entretanto, estudos demonstram que o equipamento ainda apresenta um elevado índice de falhas e tempo de indisponibilidade, sendo a válvula reguladora de pressão um dos principais componentes responsáveis por este problema. Sendo assim, o objetivo da pesquisa é desenvolver uma modelagem matemática para construção de um simulador da dinâmica da reguladora, a fim de dar suporte à implementação de estudos de manutenção baseada em condição (cbm). Seis principais etapas foram adotadas com o intuito de alcançar o objetivo do trabalho. Análise de mecanismos da física de funcionamento do componente e a identificação de parâmetros operacionais na literatura foram necessárias, bem como a modelagem e simulação computacional desenvolvida no software simulink/matlab. Os resultados alcançados nessa etapa de projeto foram aderentes à literatura, representado pelos perfis de curva de carga de pressão, velocidade e deslocamento do mecanismo de controle de fluxo. As avaliações demonstram potencial uso para auxiliar futuras análises de cenários de falhas e obter informações para implementar cbm em componentes hidráulicos do conjunto bop.

Palavras-chave: blowout preventer (bop), válvula reguladora de pressão, simulação, condition based maintenance (cbm), análise de falhas.

ABSTRACT

blowout preventer (bop) is a fundamental barrier in safety drilling and well completion operations that require availability and reliability as factors that must be efficiently managed. however, studies demonstrate that the equipment still presents a high index of failures and unavailability time, with the pressure regulating valve being one of the main components responsible for this problem. therefore, the objective of the research is to develop a mathematical modeling for the construction of a simulator of the regulator dynamics, in order to support the implementation of condition-based maintenance studies (cbm). six main steps were adopted with the purpose of achieving the purpose of the work. analysis of the physics of the component's functioning physics and the identification of operational parameters in the literature were necessary, as well as the computational modeling and simulation developed in the simulink/matlab software. the results

achieved in this project stage were adherent to the literature, represented for the pressure load curve profiles, speed and displacement of the flow control mechanism. the evaluations demonstrated potential use to aid future fault scenario analysis and obtain information to implement cbm in hydraulic components of the bop assembly.

Keywords: blowout preventer (bop), pressure regulating valve, simulation, condition based maintenance (cbm), failure analysis.

1 INTRODUÇÃO

Acidentes nas operações *offshore* das atividades de perfuração e completação de poços de petróleo podem ocasionar perdas humanas, ambientais e econômicas com efeitos catastróficos (VAN ASTEN, 2013). Além disso, ambientes submarinos apresentam características particulares que tornam ainda mais desafiador o planejamento a nível de projeto e processo para evitar falhas em razão da quantidade de sistemas e componentes com funções de difícil acesso que demandam grande disponibilidade.

Em ambientes tão complexos, a segurança das operações é um fator fundamental a ser considerado. Um dos maiores riscos nos processos de perfuração de poços é a ocorrência de influxos de fluido para a superfície, conhecidos como *blowouts* em razão da perda de controle da carga de pressão da coluna hidrostática por falhas operacionais ou de equipamentos (MARTINS, 2015). O principal sistema de controle e prevenção de eventos de descontrole de fluxo de fluidos é o *blowout preventer* (BOP), sendo uma barreira fundamental para a segurança no controle de pressão usado durante a perfuração e completação dos poços de petróleo e gás (MUTLU *et al.*, 2017).

Em seus estudos Holand e Rausand (1987), citam que em cada 125 poços explorados, um experienciou um *blowout*, no qual 65% ocorrem por falhas no BOP. Estas falhas podem ocasionar um alto custo para as operadoras decorrentes da interrupção das atividades de perfuração elevando o *Non-productive time* (NPT). Shanks *et al.* (2003) e Holand e Rausand (1987), destacam que ao detectar falhas no BOP é normalmente necessário puxar o equipamento para manutenção em superfície, esse é um dos eventos de paralisação com maior custo em operações *offshore*. Por isso, a detecção de sintomas de falha neste equipamento deve ser prevenida, aliada com alta disponibilidade e confiabilidade (MARTINS *et al.*, 2018).

Um componente com significativa atuação no BOP são as válvulas reguladoras de pressão (VRP). Mutlu *et al.* (2018) destaca que o desempenho dos reguladores de pressão do sistema de controle BOP afeta a disponibilidade e a operação dos componentes no mesmo sistema, por isso degradações em um regulador de pressão devem ser detectadas antes de causar falhas para evitar

riscos operacionais e de segurança, bem como tempo de inatividade não planejado e perda econômica.

Neste contexto, a manutenção baseada em condição (CBM) se torna uma alternativa atraente para ser implementada no intuito de prevenir as falhas no sistema BOP. Como objetivo principal, essa estratégia visa recomendar decisões de manutenções baseadas em informações coletadas através do monitoramento da condição ou saúde de um equipamento (JARDINE *et al.*, 2006). Igualmente, Martins *et al.* (2018), Rodrigues *et al.* (2020), Tammela *et al.* (2020¹) e Tammela *et al.* (2020²) também citaram a importância de uma boa gestão da mantenedibilidade para aumentar a vida útil do BOP, bem como a redução dos custos de manutenção por meio da diminuição de *downtimes* usando conceitos de manutenção de sistemas com foco na melhoria da confiabilidade, disponibilidade e segurança operacional, como o *Condition-Based Maintenance* (CBM) e o *Prognostic Health Management* (PHM).

Porém ainda existe uma necessidade de aperfeiçoar as ações de coletas e rastreamento dos dados provindos do BOP. Esta deficiência é um dos fatores preponderantes para um nível inadequado de confiabilidade do sistema BOP (MARTINS, 2019). Além disso, de acordo com Colombo *et al.* (2021) os estudos de avaliação de risco e confiabilidade do BOP ainda possuem deficiências em representarem de forma adequada a dinâmica do comportamento dos componentes do sistema. Dessa forma, o uso de simuladores computacionais de sistemas dinâmicos constitui uma ferramenta cada vez mais utilizada para investigar comportamento de componentes com baixo custo para execução de testes e avaliar efeitos e sintomas em sistemas complexos e simples (OLIVA; SOUZA, 2012).

Sendo assim, a presente pesquisa tem por objetivo desenvolver uma modelagem matemática por meio de um simulador, da dinâmica da VRP do sistema BOP, a fim de dar suporte à implementação da CBM. Os resultados podem auxiliar em futuras análises de modos de falhas para o planejamento de estratégias de manutenção.

O estudo apresentado nesse artigo faz parte do projeto de Desenvolvimento de Metodologia para Manutenção Baseada em Condições para BOP executado pela Universidade Federal Fluminense (UFF) e a Petrobras junto às empresas parceiras, que objetiva estabelecer ferramentas, regras de interpretação e abordagens de apoio à gestão de mantenedibilidade para as principais falhas de um BOP em operação no Brasil, por meio do monitoramento de variáveis de condições de operação e ambiente circundante.

2 SÍNTESE TEÓRICA

2.1 BLOWOUT PREVENTER (BOP)

A norma British Standard (2016) subdivide o equipamento em cinco principais subsistemas: preventores, válvulas e linhas (1); conectores hidráulicos (2); junta flexível (3); controle primário (4) e controle *backup* (5). O subsistema de controle é, no contexto da pesquisa, o mais relevante e, por isso, seu funcionamento será detalhado baseando-se nas funções de abertura e fechamento de um preventor.

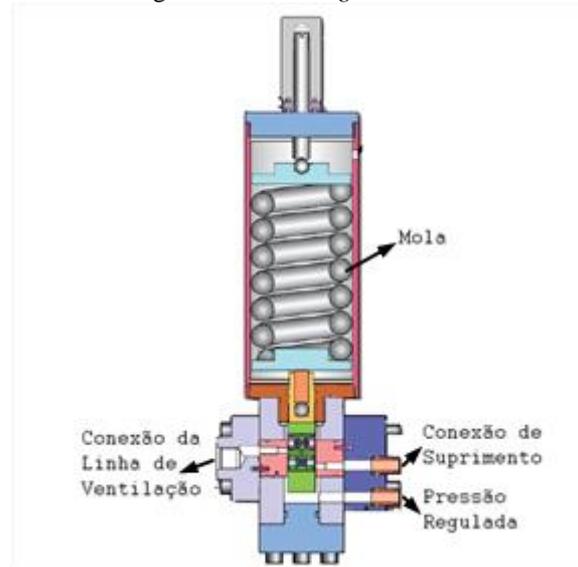
Quando o operador aciona o botão de uma função de abertura ou fechamento de um preventor no painel de superfície do BOP, uma válvula solenoide é automaticamente acionada permitindo que uma válvula direcional envie o fluido para a linha da função demandada. Posteriormente, o fluido é regulado para executar a função requerida. Ocorre uma ação inversa simultaneamente na linha da função oposta, que ventila o fluido do sistema (NETWAS GROUP OIL, 2019).

As reguladoras têm um papel fundamental em todo este processo, já que são elas que permitem que o fluido chegue no preventor com a pressão de trabalho em um nível adequado para a execução da função requerida. É necessário manter a pressão em uma faixa aceitável, já que uma pressão abaixo do nível pode não ser suficiente para manter o preventor fechado em momentos críticos de descontrole do poço, e uma pressão acima do nível pode danificar componentes da linha.

2.2 FUNCIONAMENTO DA VÁLVULA MANUAL KOOMEY REGULATOR (MKR)

O componente MKR é um tipo de VRP e pertence ao sistema de controle submarino do BOP conforme a descrição de hierarquia dos BOPs *subsea* na norma British Standard (2016) e também citado por Colombo *et al.* (2021). A principal função é regular o fluido de suprimento e piloto do sistema de controle hidráulico, de forma a reduzir a pressão de 5000psi para 3000psi (345 bar para 207 bar) (PETINDÁ, 2020). A reguladora MKR (Figura 1) tem em sua estrutura quatro principais partes: *flow plates*, *spool*, *seals* e *spring*.

Figura 1 - MKR Regulator Valve



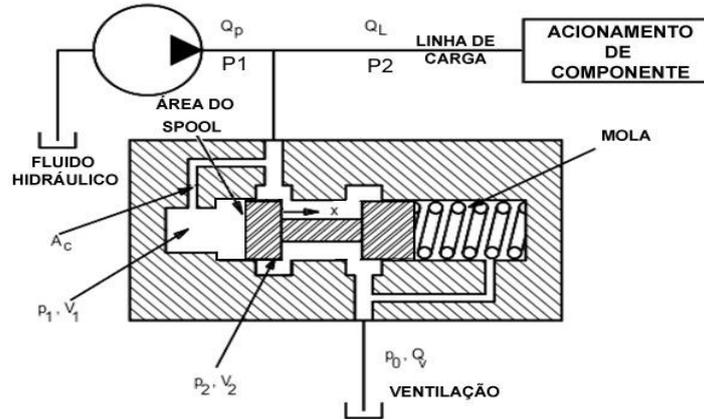
Fonte: Adaptada de Petindá (2020)

Na Figura 1, três principais linhas são identificadas na reguladora. A linha de suprimento representa o ponto de entrada do fluido de controle que tem a finalidade de gerar a força no *spool* (carretel) para que este se movimente e permita a passagem de fluido hidráulico. Na sequência, o fluido passa pela estrutura interna da válvula, sendo direcionado para linha de pressão regulada, até que ele alcance o componente final para executar a função requerida. Na dinâmica de controle, pode ocorrer que a pressão regulada aumente devido às restrições e execução de funções, e supere o limite de pressão estabelecido em projeto. Nesse caso, é preciso diminuí-la para que o equilíbrio seja mantido e preservar a integridade mecânica do sistema. O fluido é então expelido para o mar pela linha de ventilação, reduzindo a pressão.

2.3 MODELO MATEMÁTICO PARA UMA VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO

O funcionamento da válvula reguladora pode ser representado por um modelo matemático que fornece as equações básicas necessárias para estudá-lo. A Figura 2 ilustra as principais variáveis envolvidas no modelo.

FIGURA 2 - Detalhes internos da VRP no sistema dinâmico



Fonte: Adaptada de Akers *et al.* (2006)

A soma das forças na válvula fornecerá uma equação de movimento para o carretel. Nesse sentido, a Segunda Lei de Newton aplicada à reguladora é indicada pelas Equações 1 e 2, que explicitam o balanço das forças internas da MKR (AKERS *et al.*, 2006).

$$\sum F_x = m\ddot{x} \quad (1)$$

$$p_1 A - F_x - k_x x - c_x \dot{x} = m\ddot{x} \quad (2)$$

Em seguida, a conservação de massa da reguladora é dada pela Equação 3. Quando aplicada aos volumes V_1 e V_2 , geram duas equações adicionais para o modelo da válvula (AKERS *et al.*, 2006).

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\beta}{V} (Q_{in} - Q_{out}) \quad (3)$$

Por fim, o fluxo da bomba, Q_p , no volume V_2 , pode ser expresso pela Equação 4 (AKERS *et al.*, 2006).

$$Q_p = Q_c + Q_L + Q_v + \frac{V_2}{\beta_c} \dot{p}_2 \quad (4)$$

Esta equação, representada de forma descritiva, é detalhada no esquema abaixo.

$$\text{Fluxo da bomba} = \text{Fluxo através do orifício de controle} + \text{Fluxo de carga} + \text{Fluxo da válvula} + \text{Fluxo de compressibilidade}$$

Em síntese, a Equação 4 é reescrita de forma expandida, de modo que o fluxo da bomba é apresentado pela Equação 5.

$$Q_p = C_d A_c \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{|p_2 - p_1|}} + \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{A_0^2} + \frac{1}{(w(l_0 - x))^2}}} \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho}} + C_d A_v \sqrt{\frac{2}{\rho} \sqrt{|p_2 - p_0|}} + \frac{V_2}{\beta_e} \dot{p}_2 \quad (5)$$

As variáveis da equação são: Coeficiente de descarga do orifício (C_d), Área do orifício de controle (A_c), Massa específica do fluido (ρ), Pressão de controle (p_1), Pressão regulada (p_2), Pressão ventilada (p_0), Área do orifício fixo (A_0), Gradiente variável da área do orifício (w), Abertura variável inicial do orifício (l_0), Deslocamento do *spool* (x), Área de ventilação (A_v), Módulo de volume de fluido hidráulico (β), Volume interno do carretel (V_2), Massa do *spool* (m), Coeficiente da mola (k), Coeficiente de amortecimento (c_x) e Força de pré-carga da mola (F_x).

Quando aplicadas em um simulador, as equações apresentadas contribuem para a melhor compreensão do comportamento das variáveis de uma reguladora MKR, uma vez que o monitoramento dos parâmetros operacionais disponíveis permite tornar o sistema mais confiável e previsível. Além disso, torna-se viável a inserção de pontos de falha, possibilitando a interpretação das alterações produzidas nas curvas simuladas.

Na decomposição da VRP é demonstrada um grupo de dispositivos dinâmicos e estáticos que estão sujeitos a falhas em virtude da elevada carga de pressão, potencial de impurezas presente no fluido hidráulico, movimento contínuo e fadiga por esforço mecânico. Essas causas podem conduzir a sintomas que podem ser representados por meio da variação do perfil das curvas de pressão, velocidade e deslocamento do *spool* no simulador.

2.4 FALHAS NA REGULADORA MKR

A análise da base de dados das empresas operadoras de sondas de perfuração, *Reliability and Performance Information Database* (RAPID S-53) da IADC (2017) demonstra significativos registros do número de falhas no grupo de componentes de controle (6380 registros), sendo o sistema de controle o principal responsável por estes registros de falhas. Cerca de dois terços das falhas do sistema BOP são provenientes do sistema de controle. Um dos componentes responsáveis pelo elevado índice de falhas do sistema de controle é justamente a válvula reguladora MKR.

Um relatório realizado pela *Bureau of Safety and Environmental Enforcement* (BSEE) (AMERICAN BUREAU OF SHIPPING; ABSG CONSULTING INC, 2013) considera quatro principais modos de falha na MKR em suas análises. Três destes quatro modos de falhas apresentaram grau máximo (10) no fator de severidade, porém no fator relativo à detectabilidade, estes mesmos modos apresentaram um valor baixo (2). Isto reitera que as falhas pertencentes à reguladora MKR não são facilmente detectadas, porém quando ocorrem, têm um alto grau de impacto associado.

Para se alcançar uma melhor compreensão do BOP, em especial das reguladoras, é preciso monitorá-lo e entender quais são os componentes e parâmetros operacionais que necessitam ser identificados a fim de tornar o sistema mais confiável e disponível nos momentos críticos de operação. A CBM, como um tipo de manutenção preditiva, se torna uma solução adequada não só para o próprio sistema de controle, mas para o BOP como um todo.

2.5 MANUTENÇÃO BASEADA EM CONDIÇÃO (CBM)

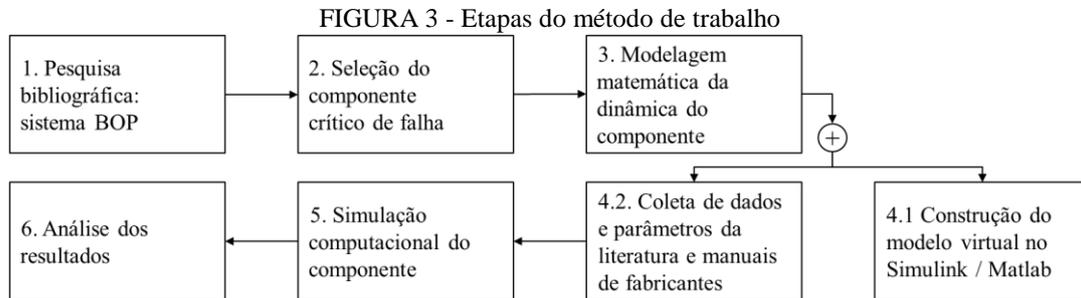
A CBM é uma “manutenção que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva” (ABNT, 1994, p.7). É útil para os equipamentos em que a segurança é considerada importante, uma vez que pode detectar problemas de forma antecipada, antes que os com o maior grau de severidade ocorra (SHIN; JUN, 2015).

A CBM se baseia na identificação de alterações do comportamento de parâmetros físicos, considerando o ambiente de operação que o sistema se encontra. Um aspecto fundamental nesta metodologia de manutenção é identificar padrões anômalos que possam representar uma situação de falha. Entretanto, entender a natureza e o grau de degradação do sistema, em muitos casos, pode ser um desafio (GUILLÉN *et al.*, 2016).

Embora projetos, como o RAPID S-53, tenham como objetivo reunir e disponibilizar dados de falha dos sistemas BOPs, ainda existe uma escassez dos mesmos quando é preciso compreender as influências destes parâmetros operacionais e físicos na vida útil dos componentes do sistema BOP (MARTINS, 2019). Isto reforça a necessidade de se propor uma alternativa em modelos simulados, para identificar comportamentos dos equipamentos, em especial da reguladora, para servir como suporte para a CBM.

3 MÉTODO DE TRABALHO

O método de trabalho foi composto por sete principais etapas, que são apresentadas na Figura 3.



Fonte: Autores (2022)

Primeiramente, foi necessário realizar uma pesquisa bibliográfica sobre o sistema BOP (etapa 1) sendo seguida da segunda etapa, na qual selecionou-se um componente crítico do sistema como objeto para a simulação. A seleção, realizada de acordo com síntese teórica, especifica a reguladora de pressão como componente crítico conforme dados da literatura. Após essa etapa, o modelo matemático foi desenvolvido com base nas equações de balanço de força e massa, com acoplamento para solução de parâmetros no regime transiente com a finalidade de verificar os princípios relativos ao comportamento do componente (etapa 3).

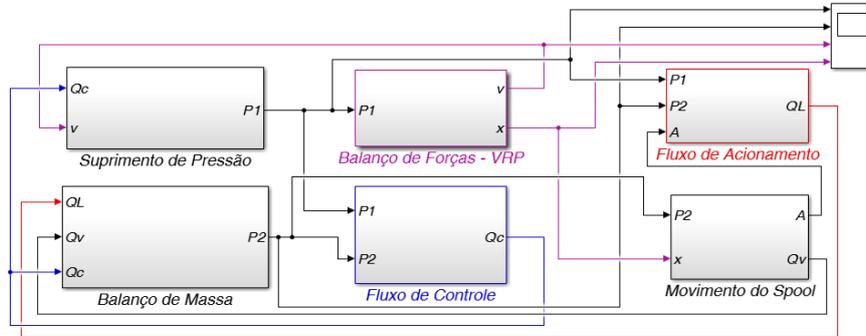
A principal fazer do método, etapa 4.1 foi responsável pela construção do modelo virtual (simulador) do componente selecionado, em que paralelamente, buscou-se identificar os parâmetros operacionais e valores na literatura e em manuais de fabricantes da reguladora (etapa 4.2). Todas as equações matemáticas encontradas na etapa 3, assim como os parâmetros identificados na etapa 4.2, serviram de base para construção do modelo e execução da simulação computacional (etapa 5) para obter os resultados para avaliar o potencial de sua aplicação em CBM (etapa 6).

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Na análise do comportamento operacional da reguladora foi utilizado o software Simulink / Matlab para construção do modelo virtual e execução das simulações da dinâmica do componente. O núcleo do modelo do sistema (Figura 4) contempla as equações de balanço de forças e da continuidade, além de valores dos parâmetros físicos e operacionais que foram utilizados para investigar no regime de tempo a variação dos perfis da curva de pressão de entrada da reguladora (P1), pressão de regulação (P2), velocidade (v) e deslocamento do *spool* (x). As

variáveis representam a principal dinâmica de interesse para efeitos de comparação de resultados e tem como primeira abordagem a finalidade da extração de dados para estimar o desempenho do simulador.

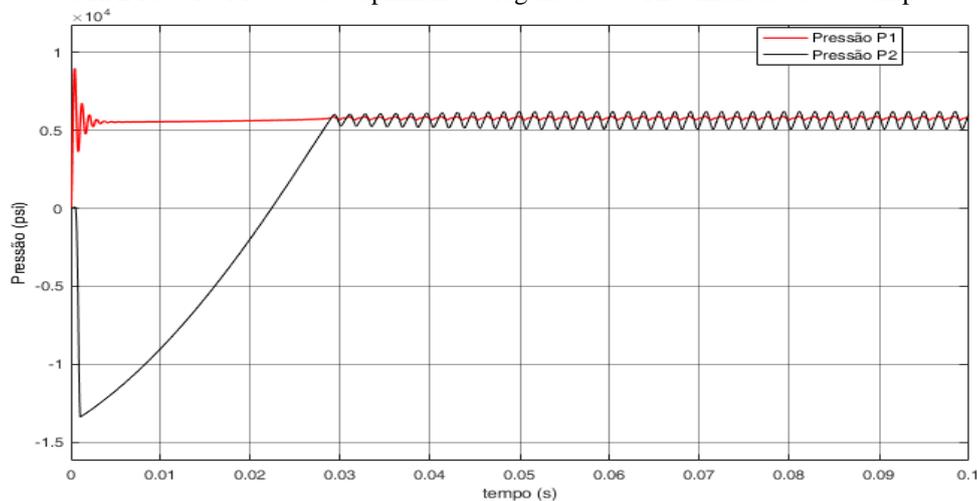
FIGURA 4 - Modelo virtual do simulador



Fonte: Autores (2022)

Os resultados da simulação dos perfis de carga hidráulica são apresentados no Gráfico 1 por meio da função de controle da pressão com a simulação configurada no intervalo de tempo de 0,1 s. O sistema simulado de acionamento da bomba ocorre no tempo de 0,025s para suprimento de fluido a uma pressão de suprimento P_1 e regulada P_2 .

GRÁFICO 1 - Pressão de suprimento e regulada da VRP simulada versus tempo



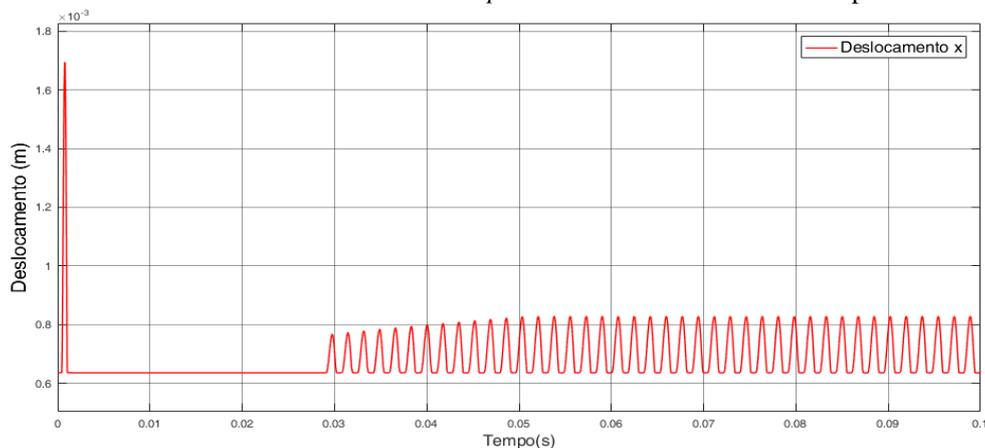
Fonte: Autores (2022)

No início do intervalo é possível verificar que a pressão P_1 apresenta um comportamento abrupto, com elevada taxa de variação quando comparada ao comportamento posterior de oscilação. Isso é natural em um sistema massa-mola conforme o desempenho da válvula reguladora, visto que é esperado que este amortea o movimento do carterel (*spool*) em função do tempo. Após este período de elevada amplitude da pressão, chega-se a um equilíbrio com

oscilação em torno de 5800psi. A pressão regulada (P2) aumenta consideravelmente no instante 0,025s (tempo de acionamento da bomba), e posteriormente se mantém oscilando em torno de P1. A reguladora atua para manter a pressão ajustada em uma mesma faixa que a P2, não permitindo que esta aumente ou diminua de forma considerável em relação a pressão de suprimento. Desse modo, o sistema na condição de saúde do conjunto da válvula sempre será governado pela divisão de fluxo hidráulico, entre a função de carga para acionamento do componente e a ventilação com os respectivos perfis de curva e valores de pressão.

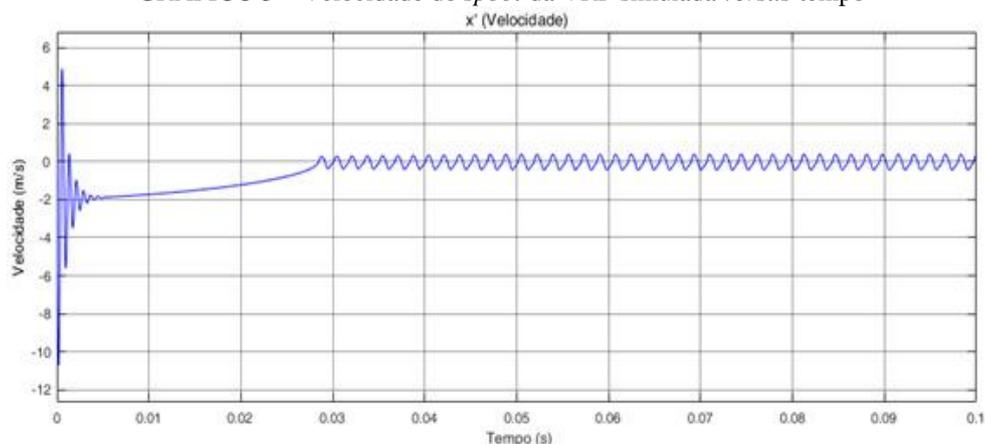
Na avaliação da dinâmica do sistema também foram gerados gráficos de parâmetros de deslocamento e da velocidade do *spool* conforme o Gráfico 2 e Gráfico 3, respectivamente, para investigar a atuação de componentes internos.

GRÁFICO 2 - Deslocamento do *spool* da VRP simulada *versus* tempo



Fonte: Autores (2022)

GRÁFICO 3 – Velocidade do *spool* da VRP simulada *versus* tempo



Fonte: Autores (2022)

As variações dos parâmetros possuem comportamentos semelhantes em relação ao perfil da taxa de pressão de suprimento. Ambas representam o que ocorre no interior da reguladora,

refletindo as forças geradas pela mola e pela carga pressão de bomba, que atua na área do *spool*. No início do intervalo, quando a pressão apresenta um comportamento com elevadas taxas de variação, é possível notar um desempenho semelhante no deslocamento e na velocidade. O estado de oscilação permanente ocorre em um mesmo intervalo de tempo, onde a amplitude se mantém constante. Nessa fase, as forças internas se compensam e mantêm o deslocamento do *spool* dentro de uma faixa constante de oscilação. Consequentemente, a curva de pressão também passa a ter o mesmo comportamento, já que é dependente da área do orifício da reguladora que se altera conforme a taxa de deslocamento do *spool*.

Vale ressaltar que a simulação não contempla um completo sistema de controle, mas única e exclusivamente a reguladora para alívio da carga de pressão e proteção mecânica do sistema, como golpe de aríete quando uma função é executada e terminada. Isto faz com que as súbitas elevações de pressão ocorram no início dos gráficos devam ser relativizadas, devido às ausências de resistências ao escoamento e restrições da variação de diâmetro de outros dispositivos que, inevitavelmente, estariam presentes caso a mesma válvula reguladora estivesse inserida em um sistema completo, com mais componentes físicos como o circuito elétrico-hidráulico do BOP.

5 CONCLUSÃO

O simulador computacional foi desenvolvido como primeira abordagem para avaliação de desempenho, ajustes do modelo e execução de futuros testes para CBM com a finalidade de investigar potenciais análises de falhas para a VRP. Sendo assim, o simulador foi construído na forma de módulos para a VRP isolada, demonstrando flexibilidade e potencial para exploração de modelos mais robustos como uma MKR, com refinamento matemático e dados específicos, como geometria de componente e parâmetros dinâmicos (constante de elasticidade de mola e coeficiente de atrito viscoso). Dessa maneira, o objetivo do presente artigo foi alcançado.

A simulação computacional foi desenvolvida com análise do tempo de resposta para as variações do perfil de pressão de suprimento de fluido hidráulico e de carga. O acionamento de componentes se assemelha conforme dados da literatura quando comparado ao atuador hidráulico padrão para o tempo de simulação de 0,1s.

No caso específico da reguladora do BOP, os resultados demonstram potencial uso para construção de modelos para um circuito elétrico-hidráulico completo e realização de testes de comportamento dinâmico em um simulador. No momento de desenvolvimento desse estudo, uma limitação foi a impossibilidade de realizar uma validação do modelo virtual por se encontrar na fase inicial de pesquisa. Com isso, uma recomendação futura, após a elaboração do circuito

elétrico-hidráulico completo, é o desenvolvimento dessa validação que poderá ser realizada com dados reais de operação.

A alteração de parâmetros na simulação e a posterior análise do perfil de curvas de pressão, velocidade e deslocamento no regime dinâmico, podem indicar estados com sintomas e anomalias em componentes para indicar hipóteses de falhas de mecanismos com potencial aplicação na CBM.

REFERÊNCIAS

- AKERS, Arthur; GASSMAN, Max; SMITH, Richard. **Hydraulic power system analysis**. CRC press, 2006.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING; ABSG CONSULTING INC. **Summary of blowout preventer (BOP) failure mode effect criticality analyses (FMECAs) for the bureau of safety and environmental enforcement**, 29 abr. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5462 - Confiabilidade e manutenibilidade**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, nov. 1994.
- BRITISH STANDARD. **Petroleum, petrochemical and natural gas industries — Collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment (ISO 14224:2016)** BSI Standards Limited, 31 out. 2016.
- COLOMBO, D. *et al.* Análise do impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP utilizando um modelo markoviano multifásico. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, 2021.
- GUILLÉN, A. J. *et al.* A framework for effective management of condition based maintenance programs in the context of industrial development of E-Maintenance strategies. **Computers in Industry**, v. 82, p. 170–185, out. 2016.
- HOLAND, P.; RAUSAND, M. Reliability of Subsea BOP systems. **Reliability Engineering**, v. 19, n. 4, p. 263–275, jan. 1987.
- IADC (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF DRILLING CONTRACTORS). **Reliability and Performance Information Database Guidance Document**. 2017.
- JARDINE, A. K. S.; LIN, D.; BANJEVIC, D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. **Mechanical Systems and Signal Processing**, v. 20, n. 7, p. 1483–1510, out. 2006.
- MARTINS, F. B. **Gerenciamento da manutenção das válvulas reguladoras do sistema de controle do BOP baseado em estudos de confiabilidade**. Trabalho de Conclusão de Curso—Rio das Ostras: Faculdade Cenecista de Rio das Ostras/ FACRO, 2015.
- MARTINS, F. B., CARDOSO, R., TAMMELA, I., COLOMBO, D., DE MATOS, B. A. Applying CBM and PHM Concepts with Reliability Approach for Blowout Preventer (BOP): A Literature Review. **Brazilian Journal of Operations & Production Management**, v. 15, p. 78-95, 2018.
- MARTINS, F. B. **Proposição de artefato para implantação da manutenção por monitoramento de condições (CBM) para o blowout preventer (BOP)**. Dissertação de mestrado—Rio das Ostras: Universidade Federal Fluminense UFF, 2019.
- MUTLU, M. *et al.* **Condition and Performance Analysis of a Subsea BOP Control System Pressure Regulator**. **Anais**. In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston, Texas, USA: OTC, 30 abr. 2018.

MUTLU, M. *et al.* **Qualitative Fault Tree Analysis of Blowout Preventer Control System for Real Time Availability Monitoring.** Day 1 Mon, May 01, 2017. **Anais...** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston, Texas, USA: OTC, 1 maio 2017.

NETWAS GROUP OIL. **Subsea Bop Control Systems - Well Control - Netwas Group Oil,** 25 maio 2019.

OLIVA, L. L.; SOUZA, M. L. DE O. E. **Modeling and simulation of a satellite propulsion subsystem by physical and signal flows.** In: 3th Workshop on Space Engineering and Technology. jun. 2012.

PETINDÁ, P. S. **Contaminação sólida no sistema de controle do BOP: metodologia de testes e análise de sensibilidade para estimativa de confiabilidade.** Trabalho de Conclusão de Curso—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), 2020.

RODRIGUES, T. A., SILVA, L. A. S., TAMMELA, I., CARDOSO, R. **PHM Applicability to BOP System Maintainability and Operations Management: A Systematic Literature Review.** International Joint Conference on Industrial Engineering and Operations Management-ABEPRO-ADINGOR-IISE-AIMASEM (IJCIEOM 2020), p. 1-11, 2020.

SHANKS, E. *et al.* **Deepwater Bop Control Systems - A Look At Reliability Issues.** All Days. **Anais...** In: OFFSHORE TECHNOLOGY CONFERENCE. Houston, Texas: OTC, 5 maio 2003.

SHIN, J.-H.; JUN, H.-B. On condition based maintenance policy. **Journal of Computational Design and Engineering**, v. 2, n. 2, p. 119–127, 1 abr. 2015.

TAMMELA¹, I., CARDOSO, C., AMARAL, M. C., MACHADO, F. S., CHAVES, L. A. O., RODRIGUES, T. A., MARINHO, R. M. F., PINTO, I. S., MARTINS, F. B., COLOMBO, D. **Análise dos modos, mecanismos e causas de falha para componentes e partes do Blowout Preventer.** Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, p. 1-13, 2020.

TAMMELA², I., CARDOSO, C., SILVA, G. V., DA SILVA, L. A. S., MEZA, E. B. M., NARCIZO, R. B., DE AGUIAR, G. J. M., DOS SANTOS, E. I., COLOMBO, D. **Construção de dicionário de variáveis de monitoramento do sistema BOP para auxiliar implantação de CBM.** Proceedings of the Rio Oil & Gas Expo and Conference, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, p. 1-13, 2020.

VAN ASTEN, P. **Pull or No-pull: Risk-based Decision Support for Subsea Blowout Preventers (BOPs).** All Days. **Anais.** In: SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition. Aberdeen, UK: SPE, 3 set. 2013.