

Análise do impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP utilizando um modelo markoviano multifásico

Analysis of the impact of test frequency on BOP availability using a multiphase markov model

DOI:10.34117/bjdv7n11-156

Recebimento dos originais: 12/10/2021

Aceitação para publicação: 10/11/2021

Danilo Colombo

M.Sc.

CENPES – PETROBRAS

Av. Horácio Macedo 950, Rio de Janeiro, Brasil, 21941-915

colombo.danilo@petrobras.com.br

Danilo Taverna Martins Pereira de Abreu

M.Sc.

Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos (LabRisco)

Universidade de São Paulo

Av. Prof. Mello Moraes 2231, São Paulo – SP, Brasil, 05508-030

danilo.abreu@usp.br

David Evandro Amorim Martins

M.Sc.

PETROBRAS

Av. Henrique Valadares 28, Rio de Janeiro, Brasil, 20231-030

davidevandro@petrobras.com.br

Fernanda Abizethe de Carvalho Daim

M.Sc.

UFF – Universidade Federal Fluminense

Rua Passo da Pátria 153, Niterói, Brasil, 24210-240

fernanda.daim@gmail.com

Filipe Brandão Martins

M.Sc.

Departamento de Engenharia – Serviço de Petróleo Constellation S. A

Rua do Engenheiro 736, Rio das Ostras, Brasil, 28899-004

fmartins@theconstellation.com

Iara Tammela

D.Sc.

Departamento de Engenharia - Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal
Fluminense (UFF)

Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, 28895-532

iaratammela@id.uff.br

Rodolfo Cardoso

D.Sc.

Departamento de Engenharia - Instituto de Ciência e Tecnologia - Universidade Federal Fluminense (UFF)

Rua Recife s/n, Rio das Ostras, Rio de Janeiro, Brasil, 28895-532

rodolfo_cardoso@id.uff.br

RESUMO

Após o acidente do Blowout de Macondo, no Golfo do México, que culminou com o afundamento da plataforma Deepwater Horizon e a morte de 11 pessoas, a legislação que envolve a segurança de poço passou a sofrer mudanças, em especial as relacionadas com Blowout Preventer (BOP). O BOP é um equipamento essencial para a segurança da perfuração, completção e intervenção do poço. Tem como função conter os fluidos da formação, com ou sem ferramentas em seu interior. Para isso, conta com corpo e conectores resistentes a pressão, bem como preventores capazes de vedar e fechar o poço mediante a necessidade. A fim de garantir seu bom funcionamento, o BOP é submetido a políticas de testes durante toda a sua vida útil. Estes testes permitem antever alguns modos de falha e, com isso, prevenir a sua ocorrência em momento indesejável durante a operação. Diferentes políticas de teste são propostas por normas internacionais, tais como API 53, BSEE 250.537 e NORSOK D-010. Dada a sua relação com a disponibilidade do BOP durante a operação, é de interesse avaliar o impacto da frequência de teste no desempenho deste equipamento. Uma limitação notável das abordagens atualmente utilizadas para avaliação de risco nas operações com BOP reside na ausência de dinamicidade destes modelos, o que limita a sua aplicação para a consideração de eventos temporais como testes e manutenções. Com o intuito de avançar na direção de avaliar o impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP, este trabalho aplica um modelo markoviano multifásico, apropriado para lidar com as características dinâmicas necessárias. Como objeto de aplicação, será analisado um circuito de acionamento de um preventor anular.

Palavras-chave: Blowout Preventer (BOP), disponibilidade, frequência de testes, gestão da manutenção, modelo markoviano multifásico.

ABSTRACT

After the Macondo Blowout accident, in the Gulf of Mexico, which culminated in the sinking of the Deepwater Horizon platform and the death of 11 people, the legislation involving well safety began to undergo changes, especially those related to Blowout Preventer (BOP). The BOP is essential equipment for the safe drilling, completion and intervention of the well. Its function is to contain the formation fluids, with or without tools inside. For this, it has a pressure-resistant body and connectors, as well as preventers capable of sealing and closing the well as needed. In order to ensure its proper functioning, the BOP is subjected to testing policies throughout its lifetime. These tests allow predicting some failure modes and, therefore, preventing their occurrence at an undesirable moment during the operation. Different testing policies are proposed by international standards such as API 53, BSEE 250.537 and NORSOK D-010. Given its relationship to the availability of the BOP during operation, it is of interest to assess the impact of test frequency on the performance of this equipment. A notable limitation of the approaches currently used for risk assessment in operations with BOP lies in the lack of dynamicity of these models, which limits their application to the consideration of temporal events such as tests and maintenance. In order to advance towards evaluating

the impact of test frequency on BOP availability, this work applies a multiphase markov model, suitable to deal with the necessary dynamic characteristics. As an application object, a circuit for activating an annular preventer will be analyzed.

Keywords: Blowout Preventer (BOP), availability, test frequency, maintenance management, multiphase markov model

1 INTRODUÇÃO

No setor de óleo e gás, uma das principais atividades, na exploração e produção dos campos *offshore*, é a intervenção em poços através do uso de plataformas especializadas, conhecidas como sondas. Estas intervenções ocorrem nas etapas de construção, manutenção e abandono de poços. Estas intervenções envolvem diversos riscos, sendo que o maior deles é o vazamento descontrolado de fluidos do poço para o meio ambiente, evento conhecido como *blowout* (Liu et al., 2015^a).

Através de regulamentos, normas e melhores práticas são delineados procedimentos de segurança que contêm orientações e requisitos para o desenvolvimento seguro e sustentável destas operações. Inúmeros são os sistemas de segurança existentes em uma sonda para garantir o controle e a segurança do poço, sendo o *Blowout Preventer* (BOP) o principal deles. A sua estrutura de instalação é organizada de forma redundante com a finalidade de promover o desempenho e a disponibilidade do mesmo. Sua função consiste em vedar e monitorar os poços, durante as intervenções, para assim garantir a segurança da sonda acoplada, da tripulação e do meio ambiente.

O BOP é um elemento no Conjunto Solidário de Barreira (CSB) secundário, sendo atuado quando ocorre a falha do elemento primário, o fluido de perfuração. Uma das principais finalidades do fluido de perfuração é exercer esse tipo de pressão superior à do fluido contido nos poros da rocha que está sendo perfurada. Quando essa pressão se torna menor, haverá um influxo do fluido dos poros para o interior do poço. Esse influxo indesejado a partir da formação (gás, óleo e água) é definido como *kick*. Em meio a essa situação são requeridas ações para controle do poço, todavia com a perda na contenção do *kick*, outro acidente se procede, o *blowout*. Este último pode ser definido como uma saída descontrolada do fluido invasor para a superfície, solo marinho ou outra formação (ANP, 2012).

A falha do BOP e as ocorrências de *kick* ou *blowout* no processo de perfuração geram consequências severas para a sociedade e ao meio ambiente, assim como danificação de equipamentos inerentes ao processo produzindo altos custos de reparo nas instalações (Cai et al., 2012^a). Um exemplo inerente foi a explosão ocorrida na plataforma

“*Deepwater Horizon*” em Macondo no golfo do México em 2010, que ocasionou a morte de 11 pessoas além de milhões de barris de petróleo derramados no mar. Pesquisas feitas por Harlow et al. (2011) e Sogdalen et al. (2011) sobre esse acidente, relatam que o BOP estava defeituoso antes do *blowout* ou foi danificado com o acidente. Entretanto, não foi constatado o erro. Frente aos desastres acarretados, a análise de desempenho do sistema de BOP se tornou essencial (Martins et al, 2018).

Marques e Brito (2019) ressaltam a importância da manutenção preditiva para a vida útil dos equipamentos, pois assim é possível diagnosticar a falha no seu estágio inicial aumentando assim, a vida útil dos equipamentos e diminuindo o custo com manutenção. Igualmente, Martins et al. (2018), Rodrigues et al. (2020) e Tammela et al. (2020) também citam a importância de uma boa gestão da manutenibilidade para aumentar a vida útil do BOP e os custos de manutenção através da redução de *downtimes* a partir do avanço dos 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).

Para assegurar seu bom funcionamento, o BOP é submetido a políticas de testes a fim de permitir a antecipação de modos de falha, e assim prevenir a ocorrência de problemas indesejáveis durante o processo operacional. Esses testes são definidos pelas normas internacionais, tais como API 53, BSEE 250.537 e NORSOK D-010. Em cada uma destas são especificadas as ações práticas, os recursos utilizados e o tempo de duração dos procedimentos de testes. Entretanto, há uma tendência nas regulamentações e normas se tornarem menos prescritivas, possibilitando aos operadores definir os intervalos de tempo ótimo para a execução dos testes, desde que se garanta os níveis de riscos adequados ou ALARP (*as low as reasonably practicable*).

Os intervalos ótimos para testes do BOP deveriam considerar não apenas as reduções de custos, mas os impactos em custo, na indisponibilidade do BOP e no impacto nas operações. Os testes do BOP e os consequentes reparos acarretam um tempo de sonda perdido e consequentemente um alto custo, dado que a diária de uma sonda offshore pode chegar facilmente a um milhão de reais. Por isso, este estudo se torna relevante como gerador de conhecimento para o setor. Para a realização dessa pesquisa foi utilizado um modelo matemático que corroborou na geração de resultados quantitativos de análise.

São variados os métodos propostos para o cálculo da confiabilidade do sistema de BOP, os quais podem ser categorizados em dois tipos: estáticos e dinâmicos. Para o primeiro caso, autores como Cai et al. (2014) e Matuzas e Contini (2015) utilizaram os

métodos tais como análise por árvore de falha, análise de modo e efeito de falha (FMEA) e redes bayesianas. Enquanto que para os eventos transcorridos no tempo, autores como Wu et al. (2016) e Taylor (1923), empregaram modelos markovianos, redes de Petri e redes Bayesianas dinâmicas. Segundo Cai et al. (2012^b), devido à flexibilidade e a variedade de estados que pode ser utilizado, o método de Markov é recorrido para avaliação do desempenho do BOP. O avanço deste método com a introdução de eventos discretos na análise de disponibilidade, o método de Markov multifásico também foi usufruído por alguns autores como Lu et al. (2015) e Cai et al. (2016). Os procedimentos de teste de BOP de uma fase anterior para a posterior é considerado um sistema multifásico e, por isso, pode ser utilizado como um suporte de estudo para ações de mudanças em políticas de manutenção como realizado por Strand e Lundteigen (2015).

Não obstante, em estudo de avaliação de risco, ainda é notável a limitação das abordagens com o uso da dinâmica dos modelos, o que impede a realização de algumas investigações, principalmente em procedimentos como de manutenção e de testes. Conseqüentemente, este trabalho busca avaliar o impacto da frequência de testes na diligência do equipamento BOP considerando um modelo markoviano multifásico. Para isso, a aplicabilidade do estudo foi executada em um mecanismo específico do BOP, conhecido como circuito de acionamento de um preventor anular.

A estrutura do artigo é organizada de acordo com o esquema descrito a seguir. A seção 2 descreve um sistema de BOP típico, sua configuração e os componentes do sistema de preventores anulares. Na mesma seção, também serão apresentadas informações sobre as normas regulamentadoras e suas características. A seção 3 contará com referências sobre as normas regulamentadoras aplicáveis. Na seção 4 será descrita a metodologia de análise, por meio do método de Markov multifásico. Por sua vez, a seção 5 apresenta e discute os resultados encontrados no estudo realizado. E, finalmente, a seção 6 conclui o artigo e apresenta as considerações finais.

2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

2.1 SISTEMA DE BOP SUBMARINO

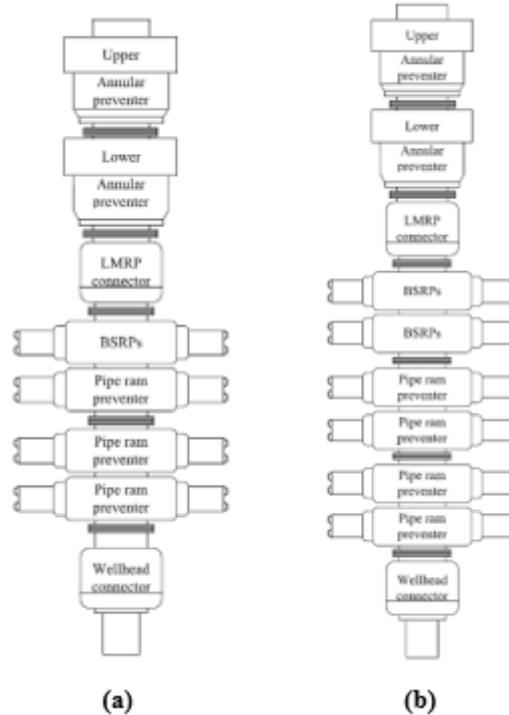
O sistema BOP é composto por diversos equipamentos, como a unidade de potência hidráulica (HPU), o *riser*, o *diverter* e o próprio equipamento BOP. O BOP submarino é uma estrutura com um grande conjunto de válvulas, principalmente composto pelos BOP *stack* e LMRP, onde se localizam os PODs de controle do BOP. Este é constituído por sistemas hidráulicos e elétricos em que estão incluídos as bombas,

válvulas, acumuladores, *manifold* e outros tipos de equipamentos. O BOP *stack* se encontra conectado, durante a operação, na cabeça do poço. O LMRP é responsável por conectar o dois preventores anulares (superior e inferior) ao BOP *stack*. O conector *wellhead* possui a mesma função, entretanto o vínculo é feito entre o BOP *stack* e o fundo do mar. Outros componentes também fazem parte desse subsistema: preventores anulares, gavetas de tubo, gavetas cegas-cisalhantes, junta flexível, linhas de *kill/choke*, entre outros (Liu et al, 2015^a; Cai et al., 2015^b; Cai et al., 2016; Liu et al., 2015^b).

A configuração do BOP *Stack* varia dependendo da região de perfuração. Até hoje não existe uma configuração padrão estabelecida. Elas podem ser divididas em dois tipos: a convencional e a moderna. A estrutura convencional é composta por dois preventores anulares, três gavetas de tubo (*pipe ram*) e uma gaveta cega-cisalhante (*blind shear ram*). Enquanto que a configuração moderna conta com dois preventores anulares, quatro gavetas de tubo e duas gavetas cegas-cisalhantes. Essas configurações se encontram na Figura 1. Os preventores como os anulares e as gavetas, têm por finalidade realizar a selagem e o corte do tubo em caso de emergência, cada um com sua especificidade. Essas distinções têm por objetivo gerar maior disponibilidade funcional em caso de falha do sistema ou subsistemas durante a ocorrência do *blowout* (Liu et al, 2015^a; Cai et al., 2012^a; Cai et al., 2015^b; Cai et al., 2016; Liu et al., 2015^b).

Cada preventor apresentado possui sua finalidade. Os preventores anulares permitem fechar o poço diante da presença ou não de uma coluna. São operados hidráulicamente para selar diferentes tamanhos de tubulações. Contudo, não são eficientes em manter a selagem em um poço aberto. Por isso, as gavetas de tubo fecham ao redor do tubo de perfuração e a gaveta cega cisalhante corta o mesmo e veda o poço em situações de emergência, sendo esta a última linha de defesa no combate ao *blowout* (Cai et al., 2016; Wu et al., 2016). Por conseguinte, cada um dos componentes tem a sua funcionalidade para garantir a segurança do poço.

Figura 1. (a) Configuração convencional do BOP stack; (b) configuração moderna no BOP stack.



2.2 PREVENTORES ANULARES

De acordo com a regra da norma API RP 59, o preventor anular (ou *annular preventer*) deve ser o primeiro elemento a ser destinado a fechar o poço (API STD 53, 2012). Seu processo consiste em comprimir com uma borracha o tubo através de um pistão e isolar o poço com ou sem coluna dentro do BOP. Seus componentes principais são o inserto (ou borracha) e os pistões das câmaras de acionamento. Quando a câmara aciona os pistões, a dupla ação dos mesmos força a borracha a se expandir para dentro do poço, vedando-o contra o que estiver dentro do BOP. Caso não haja nada dentro, a vedação ocorre, entretanto isso pode ser prejudicial para vida útil do inserto. Esse movimento é explicitado na

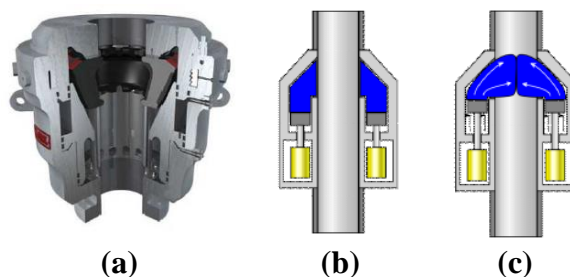
Figura 2.

Os pistões são acionados por um dispositivo eletro-hidráulico. Os componentes dele podem estar em um de dois estados – acionado ou ventilado. O acionamento de controle é constituído por uma linha de alimentação; um suprimento de pressão; um POD (*Point of Distribution*) que contém as SEM (*Subsea Electronic Module*), *mainfold*, cabo MUX; além das câmaras do anular e o inserto. O *manifold* do POD é constituído por um conjunto de válvulas reguladoras de pressão, solenoides e SPMs (API STD 53, 2012; Fernández et al. (2009).

A posição inicial dos preventores, para manter o anular aberto, é a câmara de abertura do anular pressurizada e a de fechamento sem pressão. Em caso de *kick*, a câmara de abertura é drenada e a de fechamento é pressurizada, selando assim o anular e evitando que o influxo chegue à superfície. O direcionamento da pressão entre as câmaras é feito por meio de um comando realizado no painel que é codificado pelo computador central (CCC) e transmitido por um cabo MUX até o SEM do POD. O SEM tem por função reconhecer o sinal enviado e acionar a válvula solenoide correspondente, direcionando a pressão para o piloto da sua respectiva válvula SPM, e assim promovendo a abertura. Ao SPM se abrir, há a transmissão da pressão hidráulica dos acumuladores de superfície para a câmara do anular. O pistão que se encontra nessa câmara é acionado e assim começa o processo de movimentação da borracha que promove a vedação do poço (API STD 53, 2012; BSEE, 2015).

Os componentes considerados nesse trabalho serão as válvulas SPM e SV, as reguladoras, a CCSV (Compensated Chamber Solenoid Valve) e o preventor anular. As válvulas SPM têm por finalidade realizar a comunicação da pressão para a câmara de abertura e de fechamento do anular. A SV permite o funcionamento da câmara do anular por um ou mais POD. As reguladoras conhecidas como MKR e HKR, são utilizadas como controladores hidráulicos da pressão, sendo para o manual do piloto e linha principal, respectivamente. A CCSV atua como direcionadora da pressão para a válvula SPM. E o preventor anular, caracterizado pelo movimento dos pistões e o fechamento da borracha, produz a selagem do poço (API STD 53, 2012).

Figura 2. (a) preventor anular; (b) mecanismo de funcionamento aberto; (c) fechado



3 NORMAS REGULAMENTADORAS

A sequência de procedimentos de testes são práticas que buscam garantir o bom funcionamento do BOP. Esses estão contidos em normas regulamentadoras internacionais que delimitam as atividades operacionais, os recursos utilizados e o período para execução destas. Elas são a API 53, BSEE 250.537 e NORSOK D-010. A primeira e a

segunda apresentam protocolos para o sistema do equipamento *blowout preventer* no controle de perfurações, enquanto que a última aborda sobre a integridade de poço e as barreiras de segurança ao longo do ciclo de vida, como é o caso do BOP.

A norma API 53 informa que os procedimentos de manutenção e promulgação de testes no sistema de BOP submarino são necessários para verificar a operação adequada no funcionamento específico dos componentes, a integridade da pressão dos equipamentos instalados, a compatibilidade do BOP e do sistema de controle. Essas investigações incorporam inspeções visuais, teste de funcionalidade e pressão, práticas de manutenção e perfuração. A classe de pressão de um equipamento é a máxima pressão admissível que ele pode suportar antes da falha. Cada seguimento do BOP tem um valor de trabalho distinto, como o anular que suporta até 5.000 psi. Os testes funcionais têm por objetivo verificar se os componentes são capazes de suportar a pressão especificada pelo fabricante. Os BOPs podem ser analisados a baixas e altas pressões, para assim ser possível a investigação dos preventores e das gavetas quanto a capacidade de suportar a pressão classificada por um determinado intervalo de tempo. Essa variação deve se manter por pelo menos cinco minutos sem apresentar nenhum vazamento visível. Os componentes de controle (excluindo os conectores hidráulicos e as gavetas cisalhantes) do BOP *stack* devem operar no teste ao menos por sete dias completos ou como definido pelo fornecedor. Enquanto as gavetas cegas e cegas-cisalhantes por pelo menos 21 dias (API STD 53, 2012).

A norma regulamentadora do BSEE possui como foco realizar a revisão e atualização dos regulamentos atuais de controle de poço. Ela contém uma série de novos requisitos referentes aos gaps existentes nas operações. Estes garantem que os componentes de perfuração possam realizar a sua finalidade de forma segura, em caso de emergência. Por isso, foram incorporados novos padrões e melhorias tecnológicas no setor (BSEE, 2015).

A BSEE faz referência a testes que devem ser realizados no BOP *stack*. Devido às preocupações da indústria sobre questões de segurança operacional, a norma propõe modificar a frequência de testes de pressão do BOP nas operações de descomissionamento e *workover*. Ou seja, é solicitado que haja uma mudança no intervalo de teste de 7 para 14 dias nessas atividades, como acontece nos processos de completação e perfuração. Essa harmonização entre os tempos de testes promovem a redução dos custos envolvidos, além do aumento da segurança ao reduzir as repetições das atividades que colocam em risco a operação e os funcionários (BSEE, 2015).

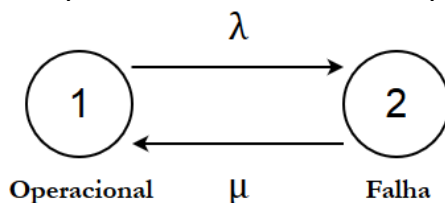
Para os procedimentos de perfuração, completação, *workover* e descomissionamento, a BSEE faz um adendo solicitando informações referentes ao intervalo de teste no BOP executados em 7, 14 ou 21 dias. Esse questionamento surge devido o custo, o risco de fatalidades, a funcionalidade e operacionalidade do BOP. Portanto, a mesma propõe a verificação dos intervalos de testes de pressão, de funcionalidade para avaliação do desempenho e a identificação dos riscos associadas com o aumento ou redução desse intervalo de frequência (BSEE, 2015). Sendo assim, justificada a necessidade desta pesquisa.

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Para a análise da disponibilidade do circuito de acionamento do *annular preventer* submetido a uma rotina de testes, será utilizado um modelo markoviano multifásico (Wu et al., 2018). Um modelo markoviano convencional para análise da disponibilidade de sistemas geralmente é construído com base em Cadeias de Markov de tempo contínuo, as quais avaliam a evolução de um sistema em seu espaço de estados ao longo do tempo – por exemplo, a transição de um componente de seu estado operacional para um estado de falha segundo algum mecanismo. Este tipo de modelo passa a ser classificado como multifásico quando são introduzidas interrupções na Cadeia de tempo contínuo, a fim de representar eventos discretos – como, por exemplo, os testes no BOP.

A Figura 3 apresenta um exemplo simples de Cadeia de Markov em tempo contínuo para um componente com dois estados: operacional e falha. Este componente transita do estado operacional para o estado de falha com uma taxa de falha constante, λ , cuja unidade geralmente é de número de falhas por hora. Analogamente, o componente transita do estado de falha para o estado de reparo com uma taxa de reparo, μ , com unidade de número de reparos por hora.

Figura 3. Exemplo de Cadeia de Markov em Tempo Contínuo



Ainda com base no exemplo da Figura 3, seja $P(t) = [P_1(t), P_2(t)]$ o vetor que representa a probabilidade de o sistema se encontrar em cada estado ao longo do tempo

($P_1(t)$ e $P_2(t)$ indicam, respectivamente, as probabilidades de o sistema estar no estado 1 e no estado 2). A evolução do sistema ao longo do tempo será dada pela equação de Chapman-Kolmogorov (Risken, 1984):

$$\frac{dP(t)}{dt} = P(t) \cdot C \quad (1)$$

Onde C denota a matriz de transição do sistema entre seus estados. Nessa matriz, o elemento C_{ij} denota a taxa de transição do estado i para o estado j para quaisquer $i \neq j$. Quando $i = j$, então $C_{ij} = -\sum_j C_{ij}$. Dessa forma, especificamente para o caso exemplo:

$$C = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda \\ \mu & -\mu \end{bmatrix} \quad (2)$$

No que diz respeito ao modelo markoviano multifásico do circuito de acionamento, foram definidos quatro estados para este sistema: 1) BOP disponível; 2) Falha perigosa não detectada; 3) BOP em teste; e 4) BOP em reparo. No primeiro estado, o BOP está pronto para atuar em caso de necessidade. No segundo estado, o BOP não está disponível para atuar e ainda não foi detectada a falha. No terceiro estado, o BOP está sendo submetido a testes que revelarão as falhas não detectadas. Por fim, no quarto estado, o BOP se encontra em reparo. A Figura 4 apresenta o modelo markoviano multifásico correspondente.

O estado 1 representa a disponibilidade do sistema, enquanto os demais representam a sua indisponibilidade. Entretanto, essas indisponibilidades se diferenciam entre si. No estado 2, há uma indisponibilidade perigosa, na qual o sistema está operando, mas não é capaz de realizar sua função. Já nos estados 3 e 4, o sistema está indisponível, mas fora de operação.

A taxa de falha, λ , entre os estados 1 e 2, foi definida como a soma das taxas de falha de cada componente do sistema. Isso é possível porque a falha de qualquer um dos componentes leva à indisponibilidade do sistema como um todo, o que sugere uma configuração em série, como exibido no diagrama de blocos da

Figura 5. As taxas de falha individuais, bem como seu somatório estão apresentadas na

Tabela 1. Já para a taxa de reparo (transição entre os estados 4 e 1), foi assumida a média de um reparo a cada 72 horas. Portanto, $\mu = 1/72 \text{ horas} = 1,39 \times 10^{-2} \text{ hora}^{-1}$.

Figura 4. Cadeia de Markov multifásica para o BOP

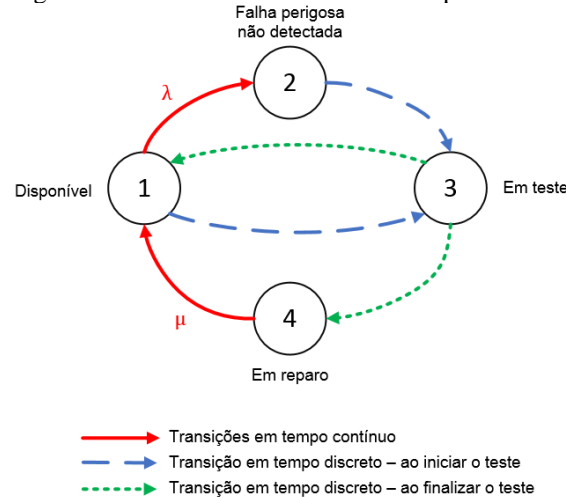


Figura 5. Diagrama de blocos equivalente do circuito analisado do BOP

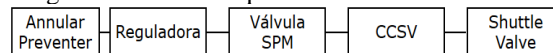


Tabela 1. Taxas de falha para os componentes do circuito de acionamento do Annular Preventer

Componente	Taxa de falha (1/hora)
Annular Preventer	$4,92 \times 10^{-5}$
Reguladora	$3,48 \times 10^{-5}$
Válvula SPM	$1,67 \times 10^{-5}$
CCSV	$2,17 \times 10^{-5}$
Shuttle Valve	$2,00 \times 10^{-5}$
	$\Sigma = 1,42 \times 10^{-4}$

As demais transições ocorrem em tempo discreto (i.e., são associadas aos eventos discretos mencionados anteriormente). Foram assumidos dois tipos de eventos discretos: início e término do teste. No início, caso o sistema esteja nos estados 1 ou 2, este passa para o estado 3, no qual estará fora de operação momentaneamente. Após o início do teste, o sistema permanece neste estado por 4 horas (tempo assumido de duração do teste). Ao término do teste, o sistema pode voltar para o estado 1, com probabilidade igual à probabilidade deste estado no início do teste, ou partir para o estado 4, com probabilidade igual à probabilidade do estado 2 no início do teste.

A matriz de transição para a Cadeia de Markov da Figura 4 é dada por:

$$C = \begin{bmatrix} -\lambda & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu & 0 & 0 & -\mu \end{bmatrix} \quad (3)$$

Cada evento discreto do modelo markoviano é modelado por uma Cadeia de Markov em tempo discreto. Na prática, isso implica em:

$$P(t) = P(t') \cdot M \quad (4)$$

Onde t' indica o instante de tempo anterior ao instante t , e M é a matriz de transição em tempo discreto. A matriz M , diferentemente da matriz C , é composta pela probabilidade de transição entre os estados, ou seja, $M_{ij} = p_{ij} \forall i, j$, onde p_{ij} representa a probabilidade de transição do estado i para o estado j . Por compatibilidade, a somatória de todos os valores de uma linha da matriz deve ser unitária.

Para o evento discreto de início do teste, tem-se que:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

A Eq. 4 indica que no início do teste, com exceção do estado 4, todos os demais transitam para o estado 3. Já para o evento discreto de término de teste, define-se um fator α como a proporção entre a probabilidade de o sistema se encontrar no estado 1 em t' em relação à soma das probabilidades de estar nos estados 1 e 2 no mesmo instante de tempo, ou seja:

$$\alpha = \frac{P_1(t')}{P_1(t') + P_2(t')} \quad (6)$$

Então, para o evento discreto de fim de teste, M será dada por:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ \alpha & 0 & 0 & 1-\alpha \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Uma vez construído o modelo markoviano multifásico, especificamente para o problema de análise de disponibilidade do BOP, é de interesse o cálculo do tempo de permanência do sistema em cada estado. Para o i -ésimo estado da cadeia, o tempo total de permanência, T_i , para um dado tempo de missão, t , é dado por:

$$T_i = \int_0^t P_i(\tau) d\tau \quad (8)$$

Onde $P_i(\cdot)$ indica a evolução da probabilidade de o sistema se encontrar no i -ésimo estado em função do tempo. A Eq. 8 por ser resolvida por meio de integração numérica, por exemplo.

Conhecidos os tempos de permanência em cada estado, pode-se calcular o custo de uma determinada política de testes e reparos. Neste trabalho, este custo é estimado em função do tempo parado de sonda por conta de testes e reparos. Dessa maneira, sendo c_t o custo total associado a uma única operação e c o custo por tempo de operação parada (sem considerar os custos do reparo em si):

$$c_t = (T_3 + T_4) \cdot c \quad (9)$$

Na Eq. 9 é importante a compatibilidade de unidades entre T_3 e T_4 (unidade de tempo) e c_t e c (unidade de custo por tempo).

Por fim, também se pode calcular o impacto da degradação nos componentes em função do teste. Neste trabalho, isso é feito de forma exploratória por meio de um fator

que multiplica a taxa de falha dos componentes a cada teste, doravante “fator de degradação”. Seja f o fator de degradação. Tem-se que:

$$\lambda_{t'} = \lambda_t \cdot f \quad (10)$$

Onde λ_t é a taxa de falha de um componente antes do teste e $\lambda_{t'}$ é a taxa de falha logo após o teste (i.e., afetada pela degradação).

5 RESULTADOS

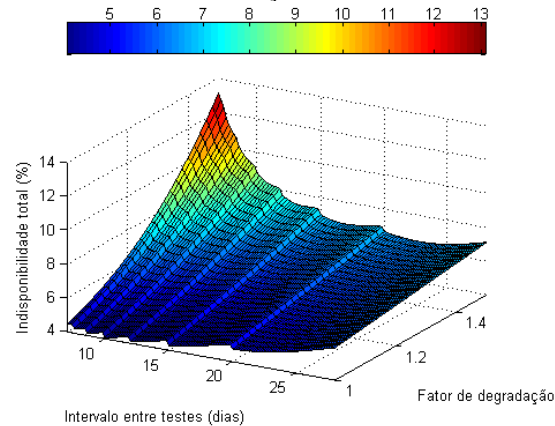
Os resultados foram gerados avaliando diferentes intervalos de tempo entre testes – de 7 a 28 dias –, bem como diferentes fatores de degradação – de 1,0 a 1,5. O modelo foi simulado utilizando rotina computacional no *software* MatLab®. Ainda, foi assumido um valor de custo por tempo de operação parada de R\$ 1.000.000,00/dia¹, tempo de missão de 60 dias e 4 horas de duração para os testes.

O gráfico da

¹ Valor fictício

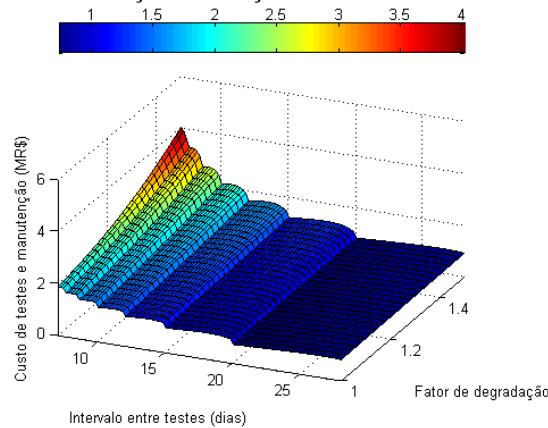
Figura 6 apresenta os resultados de indisponibilidade total em função do intervalo entre testes e fator de degradação. Trata-se do tempo que o sistema estudado permanece indisponível para operação tanto por conta de falhas (estado 2 do modelo), testes (estado 3 do modelo) ou reparos (estado 4 do modelo). Nota-se pelo gráfico que o efeito de degradação nos componentes pode ser bastante significativo para políticas de testes com elevada frequência, mais notavelmente quando o intervalo entre testes é menor do que 10 dias. O modelo atingiu um pico de indisponibilidade de 13,1% para 7 dias de intervalo entre testes e 1,5 de fator de degradação. Entretanto, na hipótese de os testes pouco degradarem os componentes, então uma política de testes mais frequente é recomendada. O valor mínimo de indisponibilidade é de 4,1% para 1,0 de fator de degradação e 10 dias de intervalo entre testes.

Figura 6. Indisponibilidade total do BOP em função do intervalo entre testes e fator de degradação



Para os parâmetros estudados, também foi gerada o gráfico de custo esperado, apresentado na Figura 7. Quanto maior o intervalo entre testes, menor é a incidência de reparos e menos tempo o componente fica parado em função dos próprios testes – o que minimiza os custos. À medida que se aumenta o fator de degradação e a frequência de testes, estes custos aumentam significativamente, justamente pela parada frequente e incidência maior de reparos, visto que as falhas começam a ser detectadas de maneira mais incisiva.

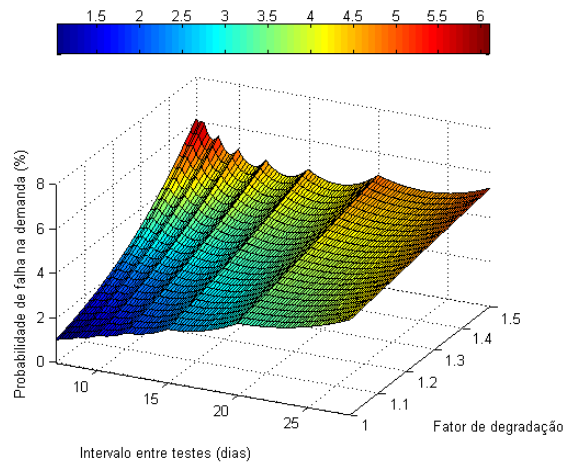
Figura 7. Custo de testes e manutenção em função do intervalo entre testes e fator de degradação



Os dois primeiros conjuntos de resultados sugerem uma relação mais vantajosa de políticas de testes com maior intervalo entre testes, visto que estas reduzem a indisponibilidade total do sistema. Entretanto, ao se olhar o risco associado, essa perspectiva muda. A **Figura 8** mostra a probabilidade de falha na demanda em função do intervalo entre testes e fator de degradação. Nota-se neste gráfico que as menores probabilidades de falha na demanda se encontram na região de menores intervalos entre

testes, tendência esta que somente se modifica para os fatores de degradação mais elevados – acima de 1,4.

Figura 8. Probabilidade de falha na demanda em função do intervalo entre testes e fator de degradação



Por fim, a Tabela 2 e a Tabela 3 apresentam resumos dos resultados para fatores de degradação iguais a 1,0 e 1,5, respectivamente. Nestes resumos estão incluídos valores típicos de intervalo entre testes adotados na indústria – 7, 14 e 21 dias.

Tabela 2. Resumo dos resultados para $f = 1,0$

	Intervalo entre testes		
	7 dias	14 dias	21 dias
Indisponibilidade total	4,5%	4,4%	4,8%
Custo	1,9 MR\$	1,2 MR\$	0,8 MR\$
Probabilidade de falha na demanda	1,1%	2,1%	3,2%

Tabela 3. Resumo dos resultados para $f = 1,5$

	Intervalo entre testes		
	7 dias	14 dias	21 dias
Indisponibilidade total	13,0%	7,3%	6,5%
Custo	4,0 MR\$	1,6 MR\$	0,9 MR\$
Probabilidade de falha na demanda	6,1%	4,3%	4,8%

Os valores de indisponibilidade total são compostos por três parcelas: a) indisponibilidade para operar na demanda devida a falha não descoberta; b) indisponibilidade durante o período de tempo que o teste é realizado; e c)

indisponibilidade durante o período de tempo que o BOP está em reparo. A primeira parcela apresenta tendência crescente à medida que o intervalo entre testes aumenta, visto que isso aumenta a probabilidade de haver uma falha não detectada. Por sua vez, as duas últimas parcelas apresentam tendência decrescente à medida que o intervalo entre testes aumenta, uma vez que passam a ocorrer menos testes e, por conseguinte, os reparos passam a ser menos frequentes.

6 CONCLUSÕES

A Tabela 2 e Tabela 3 são os resultados mais importantes que queremos observar. A primeira linha destas tabelas, mostra o cálculo da indisponibilidade do sistema BOP analisado, sob diferentes periodicidades de testes e diferentes fatores de degradação, que era justamente o objetivo do trabalho. As linhas 2 e 3 das tabelas dividem esta indisponibilidade em uma parcela de custo (devido a testes e manutenções) e uma parcela de risco, ou seja, falha na demanda. A comparação destas linhas é que permitirá o operador decidir em que binômio (risco, custo) ele quer operar.

A rotina de testes no BOP pode modificar consideravelmente o desempenho deste equipamento, cujo correto funcionamento é essencial para a segurança de poços de petróleo. Neste trabalho, foi analisado quantitativamente o impacto de diferentes rotinas de testes na indisponibilidade do equipamento e sua probabilidade de falha na demanda do circuito de acionamento do preventor anular. O custo associado a cada rotina também foi calculado. Não obstante, foi considerado o impacto dos testes na degradação dos componentes.

Os resultados mostram que rotinas com testes mais frequentes tendem a reduzir, a priori, a indisponibilidade total do sistema e sua probabilidade de falha na demanda, mas são mais custosas. Entretanto, os cenários que pressupõem um alto fator de degradação a cada teste implicam que não necessariamente esse tipo de rotina é mais vantajoso. O exato oposto é válido para intervalos maiores entre testes.

O trabalho apresentado se limita a apenas uma parte de todos os sistemas que compõem o BOP, o que não impede o aproveitamento dos resultados para compreender as tendências de comportamento do equipamento em termos da rotina de teste. Trabalhos futuros podem, por exemplo, levar em consideração um número maior de componentes e as interações entre estes. Adicionalmente, também podem ser analisadas as imperfeições associadas aos testes, tais como equívocos em detectar a falha do componente ou falsos positivos.

Como os resultados obtidos são dependentes do fator de degradação utilizado, sugere-se, como desdobramento deste trabalho, uma investigação mais aprofundada do mesmo. Outro trabalho futuro sugerido é se considerar que as taxas de falhas são dependentes do tempo.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP). 2012. “Investigação do incidente de vazamento de petróleo no campo de Frades”: Relatório Final. Superintendência de segurança operacional e meio ambiente, Julho.

API STD 53 Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells. Fourth Edition. Washington: (API), American Petroleum Institute, 2012.

BSEE.,2015, “Blowout preventer (BOP) failure event and maintenance, inspection and test (MIT) data analysis for the bureau of safety and environmental enforcement”. Washington, DC, USA: American Bureau of Shipping & ABSG Consulting Inc. and the Bureau of Safety and Environmental Enforcement.

Cai B., Liu Y., Liu Z., Tian X., Li H., Ren C., 2012^a, “Reliability analysis of subsea blowout preventer control systems subjected to multiple error shocks”. J. Loss Prev. Process. Industries 25 1044–54.

Cai, B., Liu, Y., Liu, Z., Tian, X., Zhang, Y., Liu, J., 2012^b, “Performance evaluation of subsea blowout preventer systems with common-cause failures”. Journal of Petroleum Science and Engineering, 90–91, 18–25.

Cai B., Liu Y., Fan Q., Zhang Y., Liu Z., Yu S., 2014, “Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network.” Appl. Energy; 114:1–9.

Cai, B., Liu, Y., Fan, Q., 2016, “A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels.” Reliability Eng. Syst. Saf. 150:105–15.

Fernández, E. F. Y.; Junior, O. A. P.; Pinho, A. C. 2009. Dicionário de petróleo em língua portuguesa. Editora Lexikon. Rio de Janeiro.

Harlow, W. F., Brantley, B. C., Harlow, R. M., 2011, “BOP initial imager e pair strategies after the Deepwater Horizon spill”. Public. Relat. Rev.37, p.80–83.

Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Zhang, D., Zheng, C, 2015^a, “Dynamic Bayesian Network Modeling of Reliability of Subsea Blowout Preventer Stack in Presence of Common Cause Failures”. J. Loss Prev. Process. Industries, vol. 38, pp. 58- 66, September.

Liu, Z., Liu, Y., Cai, B., Li, X., Tian, X., 2015^b, “Application of Petri nets to performance evaluation of subsea blowout preventer system”. ISA Trans; 54 240–9.

Lu, J. M., Wu, X. Y., Liu, Y., Lundteigen, M.A., 2015, “Reliability analysis of large phased-mission systems with repairable components based on success-state sampling”. Reliability Eng. Syst. Saf. 142 123–33.

Marques, A. C., Brito, J. N., 2019, “Importância da manutenção preditiva para diminuir o custo em manutenção e aumentar a vida útil dos equipamentos”. Brazilian Journal of Development, Curitiba, v. 5, n. 7, p. 8913-8923.

Martins, F. B., Cardoso, R., Tammela, I., Colombo, D., De Matos, B. A., 2018, “Applying CBM and PHM Concepts with Reliability Approach for Blowout Preventer (BOP): A Literature Review”. *Brazilian Journal of Operations & Production Management* 15, pp 78-95.

Matuzas V., Contini S., 2015, “Dynamic labeling of BDD and ZBDD for efficient non-coherent fault tree analysis”. *Reliability Eng. Syst. Saf.*;144 183–92.

Risken, H.. *The Fokker-Planck Equation*. Springer-Verlag, 1984.

Rodrigues, T. A., Silva, L. A. S., Tammela, I., Cardoso, R., 2020, “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)*, pp 1-11.

Skogdalen, J. E., Utne, I. B., Vinnem, J. E., 2011. “Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts”. *Saf. Sci.*, 48, 1187–1199.

Strand, G. O., Lundteigen, M. A, 2015, “Risk control in the well drilling phase: BOP system reliability assessment”.

Tammela, 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., 2020, “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, 2020*, pp 1-13.

Taylor, G. I., 1923, “Stability of a Viscous Liquid Contained Between Two Rotating Cylinders,” *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A*, 223, pp. 289–345.

Wu S., Zhang L., Zheng W., Liu Y., Lundteigen, M. A., 2016, “A DBN-based risk assessment model for prediction and diagnosis of offshore drilling incidents.” *J. Natural Gas Sci. Eng.*; 34 139–58.

Wu, S., Zhang, L., Barros, A., Zheng, W., Liu, Y., 2018, “Performance analysis for subsea blind shear ram preventers subject to testing strategies”. *Rel. Eng. Sys. Safety*, 169, pp. 281-298.