**AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA FREQUÊNCIA DE TESTES NA DISPONIBILIDADE E SEGURANÇA DE OPERAÇÕES COM BOP**

Danilo Colombo, PETROBRAS

Danilo Taverna Martins Pereira de Abreu, LABRISCO (USP)

Fernanda Abizethe de Carvalho Duim, UFF

**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, completação 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. O objetivo do trabalho será avaliar o binômio risco e custo. O risco será avaliado pelo critério de probabilidade de falha na demanda, definido na IEC 61058 (2010) e OLF-70 (2004), que estabelecem o SIL (*Safety Integrity Level*) e colocam referências de aceitabilidade aos mesmos. O custo será avaliado pelo tempo perdido pela sonda. Serão investigados os impactos que o próprio teste pode causar no equipamento e a possibilidade de testes imperfeitos.

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* [1].

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 [2].

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 [3]. 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 [4] e [5] 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.

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)*.

De acordo com o [6] estes testes periódicos em sistemas de segurança garantem que a probabilidade de falha por demanda (PFD) seja mantida, assim como a aceitação de alguns limites ao longo do ciclo de vida dos componentes. Entretanto, estes podem induzir os componentes testados a estresses consideráveis. Alguns testes produzem um nível de estresse que quando acumulados ao longo do tempo conduzem a significativos danos para os componentes testados. Isso significa que para um intervalo operacional fixo, o aumento do número de testes ou de forma equivalente, a redução do intervalo entre os testes podem ocasionar o aumento da probabilidade de falha por demanda (PFD) do sistema de segurança dentro do seu ciclo operacional [7]

No estudo de [7] é suscitado o grau de dano gradual causado pelos testes aos componentes que sofrem esse tipo de processo gerando resultados analíticos para testes periódicos e não periódicos. Eles propõem a existência de um intervalo ótimo de tempo para os testes dependendo da natureza do processo degradador. Para isso, a metodologia consistiu em estudar dois tipos de testes, os testes periódicos considerando igual intervalo de entre os testes e uma estrutura adaptativa, cujos intervalos de testes variam através do ciclo de vida operacional. A pesquisa constatou que existe sempre uma estratégia não-periódica ótima que torna o beneficio da realização do teste superior os efeitos danosos causados por ele. Outra consideração do estudo está em dizer que o caminho ótimo para o tempo de teste não está no intervalo de testes periódicos fixos, mas ao adotar um intervalo adaptativo que diminui a taxa de falha que aumenta devido a degradação provocada pelos testes. Usando esse tipo de intervalo o PFD sempre vai diminuir quanto mais testes forem realizados dentro do ciclo operacional fixo do equipamento.

Assim como na pesquisa realizada por [8] foi utilizado o processo de Markov para modelar a degradação dos componentes de sistemas instrumentados de segurança (SIS) quando considerado que os teste realizados para identificação do estado operacional dos componentes causam danos a essas unidades e ao sistema como um todo. O IEC 61508 promove análises sequenciais para múltiplas unidades de SIS quando seguem uma distribuição exponencial de clico de vida, entretanto nesse caso isso não pôde ser utilizado dado que algumas partes do sistema possuem uma taxa de falha variando no tempo, ou seja, ela pode aumentar depois vários testes realizados. Também é proposto, para dados determinísticos, o uso do modelo de Markov multifásico para o cálculo do tempo médio de *downtime*. Esse estudo constatou existem duas forças competitivas que aumentam a PFD. Uma delas é o multiplicador negativo que afeta a frequência de teste apesar da manutenção que é realizada como parte do teste. E a segunda é a informação obtida sobre o estado do sistema ao teste ter sido efetuado. Enquanto que a primeira força propõe a redução da frequência de teste a segunda deseja aumenta-la para produzir o mesmo efeito PFD baixo.

A mesma pesquisa avalia que a otimização para os intervalos de teste regulares pode ser contra as restrições impostas pelos requisitos do SIL (*Safety Integrity Level)*. Por isso, é sugerido que exista uma otimização da frequência para desempenho dos testes que diminua o PFD do sistema quando algumas situações forem obedecidas. A primeira dela consiste quando o teste regular envolve a inspeção do estado técnico do sistema, que provoca um efeito negativo de desempenho do sistema devido a condição e exposição do teste. Outro caso ocorre quando alguns perigosos modos de falha do sistema só podem ser revelados pelos testes regulares, e não por outros meios. E finalmente, a situação que considera quando após a manutenção o estado técnico do componente após um teste regular não alcance o estado de “tão bom quanto antes”, ou seja, quando a manutenção gerar um efeito negativo no sistema.

Visto esses dois casos de estudoe utilizando-os como base, esta pesquisa tem por objetivo estudar os níveis de SIL em diferentes políticas de teste em que se é considerado a degradação provocada pelos mesmos com a finalidade de encontrar o intervalo ótimo de teste. Os resultados encontrados constam com a evolução de tendências de no tempo e valores esperados para a para combinações dos parâmetros analisados.

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 [9] e [10] 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 [11] e [12], empregaram modelos markovianos, redes de Petri e redes Bayesianas dinâmicas. Segundo [10], 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 [14] e [15]. 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 [16].

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. Consequentemente, 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.

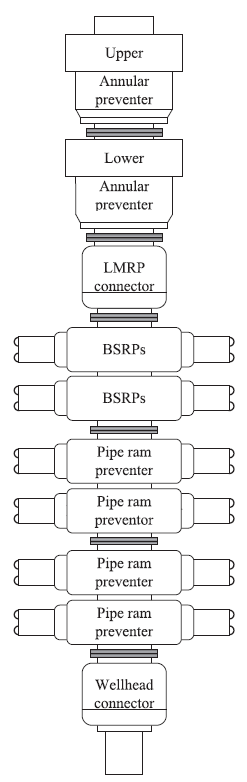
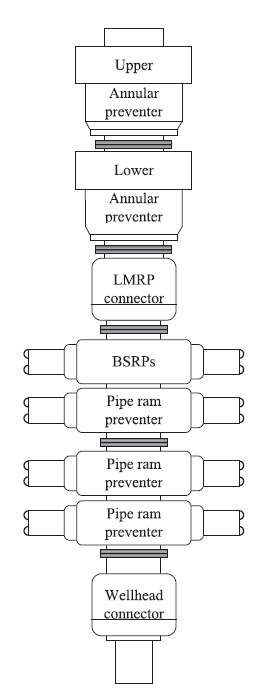
A estrutura do artigo é organizada de acordo com o esquema descrito a seguir. A seção 2 descreve um sistema de BOP típico, sua configuração e os componentes do sistema de preventores anulares. Na mesma seção, também serão apresentadas informações sobre as normas regulamentadoras e suas características. 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.

1. **DESCRIÇÃO DO SISTEMA**
   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 [1, 13, 15, 17].

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 . 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* [1, 3, 13, 15, 17].

Cada preventor apresentado possui sua finalidade. Os preventores anulares permitem fechar o poço diante da presença ou não de uma coluna. São operados hidraulicamente 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* [15, 18]. Por conseguinte, cada um dos componentes tem a sua funcionalidade para garantir a segurança do poço.Depending on the machine, if crack or plastic device that simulates the paper, see figure 1, is soil quality and being according to dimensions defined in the project.

****

(b)

(a)

|  |  |
| --- | --- |
|  |  |

**Fig. 1** - (a) Configuração convencional do BOP *stack*; (b) configuração moderna no BOP *stack*.

Fonte: [1]

Depending on the machine, if crack or plastic device that simulates the paper, see figure 1, is soil quality and being according to dimensions defined in the project

* 1. **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 [19]. 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 .

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 Distribuion*) que contém as SEM (*Subsea Eletronic 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 [19, 20].

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 [19, 9].

Os componentes considerados nesse trabalho serão as válvulas SPM e SV, as reguladoras, a CCSV (*Compensed 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 [19].

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  |  |  |
| **(a)** | **(b)** | **(c)** |

**Fig. 2** - (a) preventor anular; (b) mecanismo de funcionamento aberto; (c) fechado

Fonte: [9]

1. **NORMA REGULAMENTADORA**

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 especifico 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 [19].

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 [9].

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 [9]

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 [9]. Sendo assim, justificada a necessidade desta pesquisa.

1. **AVALIAÇÃO DO SIL ATRAVÉS DA PROBABILIDADE FALHA NA DEMANDA(PDF)**

Há uma certa relutância por parte dos operadores e dos *drilling contractors* na realização dos testes periódicos do sistema BOP devido a necessidade de se interromper as operações e o tempo gasto nas manobras para o teste.

Por esta razão, é importante adotar critérios objetivos que definam a necessidade de realização dos testes periódicos. A [21] (regulamentações internacionais para sistemas de segurança instrumentados) tem adotado o SIL para especificar o nível desejado mínimo de redução de risco para qualquer SIS [22].

A determinação da probabilidade de falha por demanda (PFD) ou a taxa de falha por hora, permite que se determine quantitativamente o SIL [23]. O BOP é um sistema de baixa demanda, pois é acionado apenas em situações onde há um influxo no poço. Logo, para sistemas de baixa demanda os níveis de SIL são dados pela Tabela 1.

**Tab.1** – Valores Requeridos de Probabilidade Média de Falha na Demanda para cada SIL

|  |  |
| --- | --- |
| SAFETY INTEGRITY LEVEL | Probabilidade Média de Falha na Demanda (PFDmed) |
| 4 | ≥ 10-5 a <10-4 |
| 3 | ≥ 10-4 a <10-3 |
| 2 | ≥ 10-3 a <10-2 |
| 1 | ≥ 10-2 a <10-1 |

Fonte: [21]

A OLF 070 [24] traz a aplicação da IEC 61508/61511 para a indústria de óleo e gás norueguesa, incluindo requisitos de SIL para diversas funções de segurança, SIF (S*afety Instrumented Function*). Não há um requisito explícito para a função de acionamento do BOP anular, porém, por similaridade utilizou-se o das gavetas cegas-cisalhantes e de revestimento, conforme Tabela 7.5.4 [24]. A Tabela 2 foi adaptada, portanto, para a SIF Fechamento do Preventor Anular.

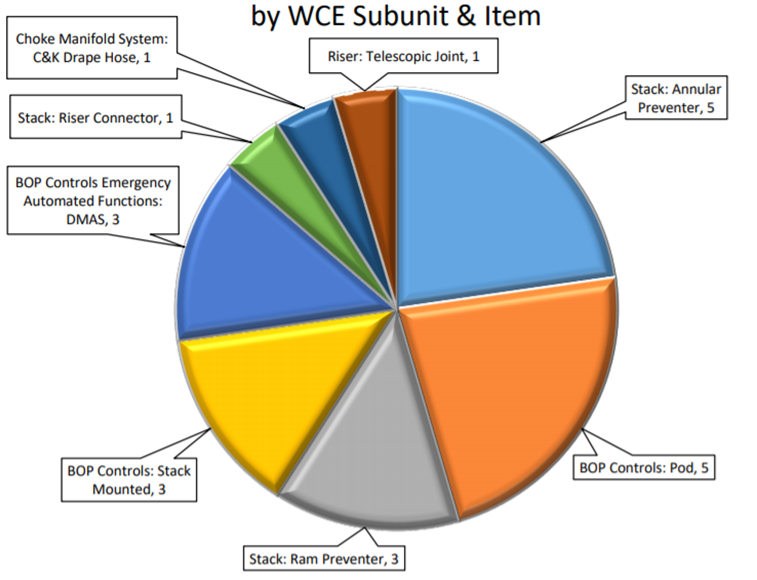
**Tab.2**– SIL Mínimo requerido para o Preventor Anular

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| SAFETY INTEGRITY FUNCTION (SIF) | SIL REQUERIDO | Descrição |
| Fechamento do Preventor Anular | SIL 2 | Função: Fechar ao redor de itens no poço (ex. coluna de perfuração, revestimento, cabo, flexitubo, etc.) ou no vazio; e selar o poço.  Os seguintes equipamentos são requeridos:   * Botões de Acionamento * Controladores Lógicos * Sistema de Controle do BOP (válvulas) * Preventores de Anular |

Outro importante aspecto na metodologia de avaliação do SIL das funções de segurança são os dados utilizados. A IEC 61511-1 estabelece que para as análises de risco os dados de confiabilidade utilizados devem ser confiáveis, rastreáveis, documentados e justificados. Uma das principais referências para a coleta e aplicação dos dados de confiabilidade na área de óleo e gás é a ISO 14.224. Os dados podem ser obtidos de diversas fontes, sendo a mais comum o uso de dados genéricos. Os dados genéricos refletem um comportamento médio esperado dos equipamentos em campo. Um dos bancos de dados que utiliza como norteamento a ISO 14.224 é o relatório da RAPID-S53.

O relatório anual de 2017 da RAPID-S53 consta com a aglutinação de dados coletados sobre todos os eventos referentes às falhas dos equipamentos de controle de poço que impactam as operações das plataformas mundiais dos membros participantes do IOGP/IADC. Esta fusão de informações tem como finalidade avaliar o desempenho dos componentes e concomitantemente promover um desejo por parte do setor em realizar melhorias que contribua na performance geral do sistema e na confiabilidade dos componentes.

Foi constatado que houve em 2017 um total de 2040 eventos de controle de poço. Em que destes, 1475 foram observados quando o *BOP-stack* não estava operando, ou seja, enquanto o mesmo estava sofrendo algum tipo de inspeção, manutenção ou teste antes de ser alocado em operação. Os 565 eventos restantes ocorreram quando o mesmo estava em operação. Entretanto, devido a redundância do equipamento, apenas 22 deles exigiram a retirada do *BOP-Stack* de forma não planejada para restabelecer a integridade do sistema. Por isso, estes foram estudados a fim de identificar o problema ocorrido. Após avaliações, foram observados que as falhas estavam relacionadas a alguns componentes como o Preventor Anular, o sistema de controle do BOP, o *Riser* e outros. A figura 3 apresenta o equipamento envolvido e a quantidade de eventos relacionados. Ao longo do relatório são apresentadas a descrição dos eventos e suas ações de controle.

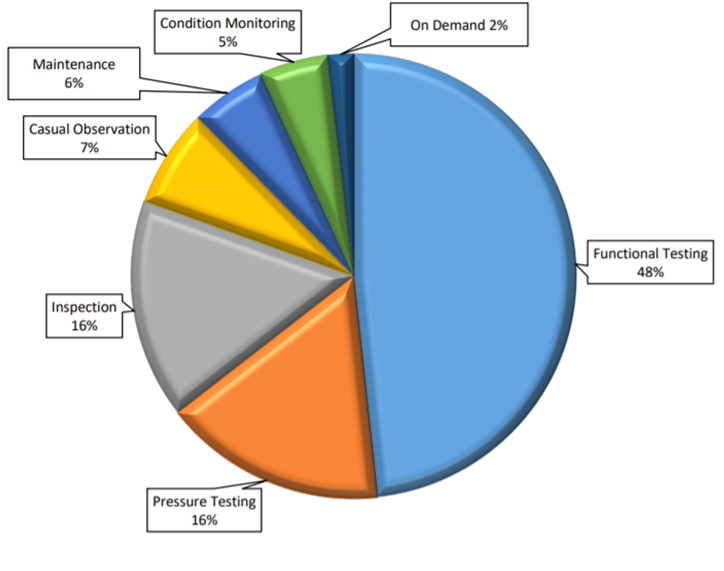


**Fig. 3** – Eventos e seus respectivos componentes causais

Fonte: RAPID-S53

Isso indica que dentre os 22 eventos ocorridos, 10 deles estão associados ao sistema de controle do BOP e ao Anular, ou seja, 46 % dos eventos. O que ressalta a importância do estudo o uso desses dois componentes para avaliação do mais adequado intervalo de teste para o sistema de BOP.

Como abordado anteriormente, os eventos ocorridos quando o *BOP-Stack* estava fora de operação representa um total de 72%. Ao discriminar os métodos de detecção empregados para identificar os problemas foi observado que 48% destes foram por intermédio de testes funcionais. Isso demonstra a importância da realização de testes periódicos no sistema de BOP para prevenção de eventos não desejados. A figura 4 apresenta as formas de detecção dos problemas para os 1475 eventos.



**Fig. 4** – Porcentagens de cada método de detecção da falha

Fonte: RAPID-S53

Para essa pesquisa, o cálculo da taxa de falha para os componentes estudados, o preventor anular, reguladora, a válvula SPM e o CCSV, foi utilizado os dados contidos na base do RAPID-S53. Foram coletados os tempos de falha dos equipamentosconsiderados na pesquisa. Para cada uma desses componentes foi aplicado um teste de máxima verossimilhança para identificação da melhor distribuição. Com isso, foi constatado que uma distribuição exponencial foi o mais aderente na representatividade a partir dos dados existentes. Por esse motivo, nesse estudo será utilizada a taxa de falha dos componentes para o cálculo do PFD e dos níveis do SIL.

1. **METODOLOGIA DE ANÁLISE**
   1. **Escopo da Análise**

O modelo para análise do impacto da frequência de testes no preventor anular (*annular preventer*) e seu sistema de acionamento combina duas técnicas tradicionais de modelagem da confiabilidade de sistemas de engenharia: cadeias de Markov e diagramas de bloco de confiabilidade. A primeira técnica permite avaliar a evolução de estados de um ou mais componentes ao longo do tempo, de maneira estocástica. Por sua vez, a segunda técnica é tipicamente utilizada para modelar a confiabilidade de sistemas simples com relações do tipo série-paralelo entre componentes. Cada técnica de modelagem será descrita sucintamente nesta seção, assim como a combinação de ambas.

A modelagem da confiabilidade ou disponibilidade de componentes por meio de cadeias de Markov pressupõe que o componente (ou sistema) estará em um estado dentro de um conjunto de estados possíveis, tais como “disponível”, “degradado”, “em *standby*” e “indisponível”, ao longo do tempo [25]. O espaço de estados geralmente é descrito por meio de um vetor de probabilidades, no qual cada posição indica a probabilidade de o sistema se encontrar em um determinado estado num dado instante de tempo. A evolução do sistema ao longo do tempo pode ser abordada de duas maneiras distintas: discreta ou contínua.

No caso de um sistema que evolui de maneira discreta, tem-se que a evolução no espaço de estados ocorre de acordo com a relação na Eq. :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Onde é o vetor de probabilidades dos estados no instante de tempo , é o vetor de probabilidades dos estados no instante seguinte a e é a matriz geradora da cadeia de Markov. Se é um vetor coluna, então o elemento dessa matriz indicará a probabilidade de o sistema migrar para o estado no próximo instante de tempo, dado que se encontra no estado no instante atual. Intrínseca a essa abordagem está a premissa de que o estado futuro do sistema depende somente de seu estado presente e não do histórico de estados pelos quais este sistema passou. Essa premissa é denominada de propriedade markoviana.

No caso contínuo, assume-se que a transição entre os estados ocorre continuamente ao longo do tempo – i.e., não há mais pulos entre instantes de tempo discretos. A única distribuição de probabilidades para variáveis de tempo contínuo que atende a propriedade markoviana é a exponencial, cuja função de densidade de probabilidade é dada por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

Na qual denota a taxa de ocorrência do fenômeno observado, dada em termos do número esperado de ocorrências por unidade de tempo (e.g., hora-1, ano-1).

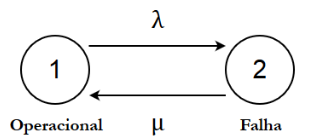
De maneira análoga à Eq. , a evolução do sistema no tempo pode ser expressa pelo seguinte sistema de equações diferenciais:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

Na Eq. , passa a denotar a matriz geradora da cadeia de Markov em tempo contínuo. Considerando novamente um vetor de probabilidade de estados coluna, o elemento denota a taxa de transição do sistema para o estado , dado que este se encontra no estado . Em especial, para o caso em que , é igual à soma de todas as taxas partindo do estado , multiplicada por .

A figura 5, exemplifica uma Cadeia de Markov para cálculo da disponibilidade de um componente, com dois estados – operacional e falha. Os valores de e denotam, respectivamente, as taxas de falha e reparo deste componente hipotético. Representando a probabilidade do estado operacional por e do estado de falha por , tem-se que a equação de evolução do sistema será dada por:

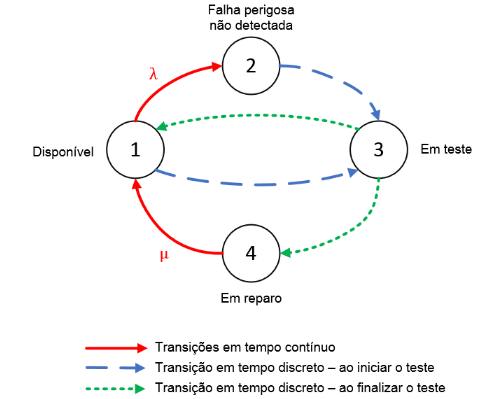
|  |  |
| --- | --- |
|  | () |



**Fig. 5** – Exemplo de Cadeia de Markov

Para a avaliação da disponibilidade de sistemas submetidos a políticas de testes, uma das possíveis abordagens envolve o uso de cadeias de Markov multifásicas [26]. Neste tipo de modelo, as cadeias de tempo contínuo são adotadas para a modelagem da ocorrência das falhas perigosas não detectadas ao longo do tempo, enquanto cadeias de tempo discreto modelam os testes e a descoberta dessas possíveis falhas.

A figura 6 apresenta o modelo markoviano multifásico para a análise de disponibilidade de componentes submetidos a testes. Assume-se quatro possíveis estados para o componente: 1) disponível; 2) falha perigosa não detectada; 3) em teste; e 4) em reparo. No estado disponível, o componente está preparado para exercer sua função. No estado de falha perigosa não detectada, o componente se encontra indisponível para operar na demanda, mas essa possibilidade de falha ainda é desconhecida pelos operadores. O terceiro estado indica o componente indisponível por conta da realização do teste. Caso o tempo de duração do teste seja desprezível, este estado pode ser omitido da cadeia. Finalmente, o quarto estado, em reparo, indica que o componente está indisponível e sendo reparado por conta da falha detectada pelo teste.



**Fig. 6** – Cadeia de Markov Multifásica para Análise de Disponibilidade de Componentes Submetidos a testes

Fonte: [27].

A Eq. indica a equação diferencial da evolução em tempo contínuo do sistema, enquanto a Eq. considera a evolução discreta que ocorre no momento do teste. O fator indica a probabilidade de erro no teste, i.e., de o teste não permitir a detecção da falha.

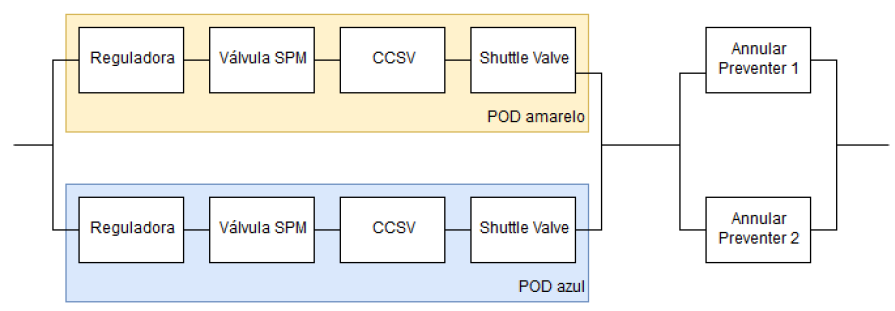
|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |

|  |  |
| --- | --- |
|  | (6) |

O modelo multifásico representará a evolução do sistema ao longo do tempo pela modelagem contínua interrompida pelos testes a cada período de intervalo entre testes. Portanto, são esperadas curvas de evolução do sistema no tempo com descontinuidades a cada instante de execução de um teste.

Uma vez desenvolvido o modelo markoviano multifásico, uma questão fundamental surge: como integrar o comportamento de cada componente na lógica do sistema? Em outras palavras, deseja-se conhecer a indisponibilidade do sistema em função do tempo, levando em consideração as políticas de teste e reparo pertinentes.

A integração é realizada por meio dos diagramas de blocos de confiabilidade. A figura 7 apresenta a lógica do preventor anular com seu aparato de acionamento. Nesta configuração há dois *annular preventers* em paralelo, assim como dois sistemas de acionamento também em paralelo, denominados PODs amarelo e azul. Cada um dos PODs é composto por reguladora, válvula SPM, CCSV e *shuttle valve*.



**Fig. 7** – Diagrama de Blocos do Sistema

O diagrama de blocos da figura 8 apresenta o diagrama da figura 7 de maneira simplificada e numerada sistematicamente. Os blocos 1, 2, 3 e 4 representam, respectivamente, o POD amarelo, o POD azul, o *annular preventer* 1 e o *annular preventer* 2. Denotando por a probabilidade de falha do -ésimo bloco e aplicando a lógica em paralelo, tem-se que a probabilidade de falha de ambos os PODs simultaneamente, , será dada por:

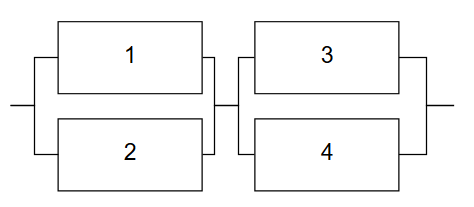
|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

De maneira análoga, a probabilidade de falha dos preventores anulares, , será dada por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

Finalmente, a probabilidade de falha do sistema, , é calculada considerando a lógica em série entre os conjuntos de PODs e preventores. Com isso, será expressa por:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (9) |



**Fig. 8** – Diagrama de Blocos Equivalente

Em especial, para sistemas de segurança operando em modo de demanda, como no caso analisado, é interessante expressar a chance de falha em termos da probabilidade média de falha na demanda, denotada por . Com isso, torna-se possível a comparação com os níveis de integridade de segurança (SIL, do termo em inglês, *Safety Integrity Level*) apresentados na 3. O valor de para sistemas sujeitos a testes pode ser estimado da seguinte forma [28]:

|  |  |
| --- | --- |
|  | () |

Onde denota a indisponibilidade do sistema, é o número total de inspeções e o período entre testes.

**Tab.3**– Níveis de SIL para o Modo de Operação em Demanda

|  |  |
| --- | --- |
| Nível de SIL | Requisito para |
| 4 |  |
| 3 |  |
| 2 |  |
| 1 |  |
| Fonte: [29] | |

No caso do modelo markoviano multifásico, a probabilidade de falha na demanda de cada componente – no caso, sua indisponibilidade – será dada pela probabilidade de este se encontrar no estado 2, vide afigura 6. Estas probabilidades, enfim, são combinadas por meio da Eq. para o cálculo da indisponibilidade do sistema. Ressalta-se que neste modelo é assumida a premissa que não haverá demanda da função de segurança se o sistema estiver passando por reparo.

* 1. **Aplicação da Metodologia**

O modelo descrito nesta seção foi aplicado para a avaliação do nível de SIL sob diferentes políticas de testes. Também foi realizada uma análise de sensibilidade em relação à probabilidade de erro no teste, . Não obstante, também foi considerado um fator de degradação dos testes, para o qual a sensibilidade também foi estudada. Este fator de degradação multiplica a taxa de falha dos componentes a cada teste executado.

A tabela 4 apresenta os valores adotados de taxa de falha para os componentes do sistema, extraídas da experiência operacional de operadoras. Deve-se notar que, devido à lógica de disposição em série, as taxas de falha dos componentes que compõem os PODs podem ser somadas para a modelagem de cada POD como uma única unidade. Além das taxas de falha apresentadas, os seguintes parâmetros foram adotados na simulação:

* Tempo de missão: 60 dias;
* Tempo entre testes: 7 a 30 dias;
* Fator de degradação: 1,0 (sem degradação) a 1,1 (degradação pesada);
* Probabilidade de erro no teste: 0% a 50%.

**Tab.4** – Taxas de Falha adotadas para os componentes do sistema

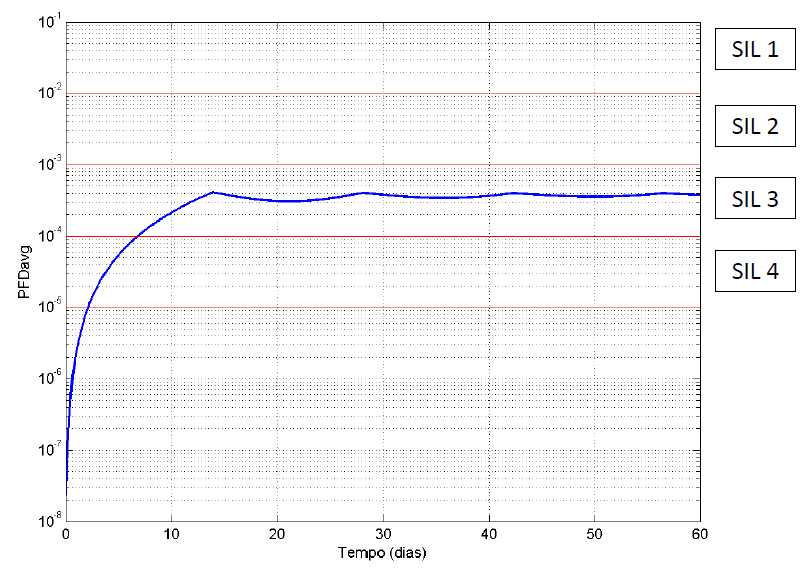
|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Componente** | **Taxa de falha [1/h]** | **Notação** | **Observação** |
| *Annular preventer* | 4,92E-05 |  |  |
| Reguladora | 3,48E-05 |  |  |
| Válvula SPM | 1,67E-05 |  |  |
| CCSV | 2,17E-05 |  |  |
| Shuttle valve | 2,00E-05 |  |  |
| POD amarelo | 1,42E-04 |  |  |
| POD azul | 1,42E-04 |  |  |

A seção seguinte apresenta e comenta os resultados obtidos.

1. **RESULTADOS**

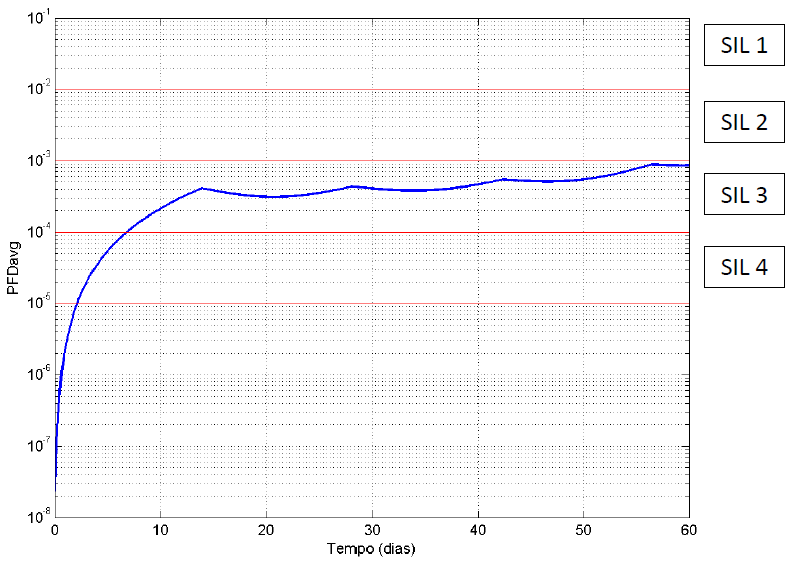
Dois tipos de resultados foram gerados neste trabalho: evolução de tendências de no tempo e valores esperados para a para combinações dos parâmetros analisados.

O gráfico da figura 9 apresenta a evolução da em função do tempo para uma política de testes a cada 14 dias e sem considerar o efeito de degradação induzida pelo teste. Observa-se que neste cenário a cresce rapidamente até o primeiro teste, a partir do qual se mantém estável dentro do nível SIL 3. A cada 14 dias, é possível notar pequenos picos, que representam os testes conseguintes.



**Fig. 9** – Evolução da em função do tempo para o período entre os testes de 14 dias, sem considerar degradação induzida pelo teste

De modo semelhante, a figura 10 apresenta também a evolução da no tempo, mas considerando neste caso a degradação induzida pelos testes. Observa-se que o nível de aumenta ao longo do tempo, tendendo a sair do nível SIL3 para o nível SIL2.



**Fig. 10** – Evolução da em função do tempo para período entre testes de 14 duas, considerando degradação induzida pelo teste.

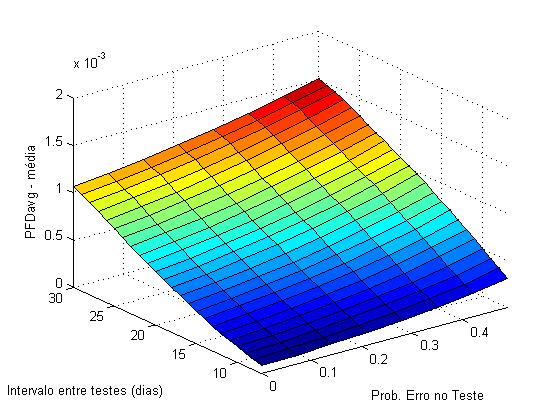
A figura 11 apresenta os valores esperados de em função do intervalo entre testes e fator de degradação. Nota-se que a partir dos fatores de degradação moderados (i.e., maiores que 1;05), deixa de ser recomendada a realização de teste com alta frequência. Em particular, para a o fator de degradação mais pesado estudado, de 1.10, fica evidente na curva um ponto de ótimo ligeiramente afastado da região de testes mais frequentes.

Por fim, a figura 12 apresenta os valores esperados de considerando diferentes probabilidades de falha nos testes para diferentes tempos de intervalo entre testes. Da superfície gerada, nota-se que o impacto deste fator não é intenso ao ponto de fazer o componente mudar de nível de SIL isoladamente. Naturalmente, o efeito deste fator praticamente evanesce para políticas de testes frequentes.

Uma imagem contendo texto

Descrição gerada automaticamente

**Fig.11** – Expectativa de em função do intervalo entre testes e fator de degradação



**Fig. 12** – Expectativa de em função do intervalo entre testes e probabilidade de erros no teste

1. **CONCLUSÃO**

O trabalho proposto teve por objetivo identificar o intervalo de tempo ótimo de teste para o equipamento de BOP considerando o preventor anular e as válvulas do sistema de controle(PODs). Para isso, foi utilizado uma cadeia de markov multifásica, capaz de modelar os estados do sistema e os testes em intervalos determinísticos. As taxas de falha utilizadas foramobtidas pela análise de dados de vida com os tempos de falhas contido no banco de dados RAPID-S53 do IADC. Também foram considerados os efeitos dadegradação causada pelo teste que provoca uma modificação na taxa de falha dos itens e da imperfeição nos testes.

Foi realizada uma comparação entre a evolução da em função do tempo para uma política de testes a cada 14 dias sem considerar e considerando o efeito de degradação induzida pelo teste. A figura 9 e 10 indica os resultados encontrados nessas condições. Nos dois casos o nível de integridade do sistema se encontra na faixa de SIL 3, entretanto ao aceitar essa degradação o nível se encontra um pouco mais perto da faixaSIL 2.Portanto, essa degradação causada pelos testes interfereno intervalo ótimo de teste. É observado então que para fatores de degradação moderados não é recomendado o uso de testes frequentes. Outro caso explorado foi a não interferência do intervalo de teste em relação à probabilidade de erro do teste. Ao considerar a de diferentes probabilidades de falha nos testes para diferentes tempos de intervalo, o impacto do fator não é suficiente para modificar o SIL, o que indica que não interfere nos testes frequentes.

O trabalho se limitou a considerar o sistema de preventor anular e os dois subsistemas que mais falham, o sistema de controle e os preventores em si, não considerando o *pushbuttom* e a lógica para avaliação do SIL de uma SIF do BOP, como sugerido pela [29]. Portanto, para trabalhos futuros será considerado essa série no estudo na interferência da probabilidade de falha de demanda. Outro fator não julgado foi o uso do fator de cobertura na redundância do sistema. Este poderá ser utilizado para análise da otimização do intervalo de teste a partir de informações geradas por opiniões de especialistas.

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 taxas de falhas são dependentes do tempo.

1. **REFERENCES:**
2. LIU, Z., LIU, Y., CAI, B., ZHANG, D., ZHENG, C. “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 (2015).
3. AGÊNICA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEL (ANP). “Investigação do incidente de vazamento de petróleo no campo de Frades”: Relatório Final. Superintendência de segurança operacional e meio ambiente, Julho (2012).
4. CAI B., LIU Y., LIU Z., TIAN X., LI H., REN C. “Reliability analysis of subsea blowout preven- ter control systems subjected to multiple error shocks”. J. Loss Prev. Process. Industries 25 1044–54 (2012).
5. HARLOW,W. F., BRANTLEY, B. C., HARLOW, R. M.. “BOP initial imager e pair strategies after the Deepwater Horizon spill”. Public. Relat. Rev.37, p.80–83 (2011).
6. SKOGDALEN, J. E., UTNE, I. B., VINNEM, J. E.. “Developing safety indicators for preventing offshore oil and gas deepwater drilling blowouts”. Saf. Sci., 48, 1187–1199 (2011).
7. BSEE.“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 (2015).
8. HAFVER,A., OLIVEIRA, L. F, PEDERSEN, F.B. OPtimal Schedulig of Test of Safety Systems, considerinh Test-induced Degradation. European Safety and Reliability Conference – ESREL (2019)
9. SRIVASTAV, H.; AZEVEDO, V. G.; BARROS, A.; LUNDTEIGEN, M..A, PEDERSEN, F.B., HAFVER, A.; OLIVEIRA, L.F. Optimization od Periodica Inpection Time of SIS Subject to a Regular Proof Testing. European Safety and Reliability Conference – ESREL(2018)
10. CAI B., LIU Y., FAN Q., ZHANG Y., LIU Z., YU S. “Multi-source information fusion based fault diagnosis of ground-source heat pump using Bayesian network.” Appl. Energy; 114:1–9 (2014).
11. MATUZAS V., CONTINI S.“Dynamic labeling of BDD and ZBDD for efficient non-coherent fault tree analysis”. Reliability Eng. Syst. Saf.;144 183–92 (2015).
12. WU S., ZHANG L., ZHENG W., LIU Y., LUNDTEIGEN, M. A.“A DBN-based risk assessment model for prediction and diagnosis of offshore drilling incidents.” J. Natural Gas Sci. Eng.; 34 139–58 (2016).
13. TAYLOR, G. I. “Stability of a Viscous Liquid Contained Between Two Rotating Cylinders,” Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A, 223, pp. 289–345 (1923).
14. CAI, B., LIU, Y., LIU, Z., TIAN, X., ZHANG, Y., LIU, J. “Performance evaluation of subsea blowout preventer systems with common-cause failures”. Journal of Petroleum Science and Engineering, 90–91, 18–25 (2012).
15. LU, J. M., WU, X. Y., LIU, Y., LUNDTEIGEN, M.A.“Reliability analysis of large phased-mission systems with repairable components based on success-state sampling”. Reliability Eng. Syst. Saf. 142 123–33 (2015).
16. CAI, B., LIU, Y., FAN, Q. “A multiphase dynamic Bayesian networks methodology for the determination of safety integrity levels.” Reliability Eng. Syst. Saf. 150:105–15 (2016).
17. STRAND, G. O., LUNDTEIGEN, M. A.“Risk control in the well drilling phase: BOP system reliability assessment” (2015).
18. LIU, Z., LIU, Y., CAI, B., LI, X., TIAN, X..“Application of Petri nets to performance evaluation of subsea blowout preventer system”. ISA Trans; 54 240–9 (2015).
19. WU, S., ZHANG, L., BARROS, A., ZHENG, W., LIU, Y.“Performance analysis for subsea blind shear ram preventers subject to testing strategies”. Rel. Eng. Sys. Safety, 169, pp. 281-298 (2018)..
20. API STD 53 Blowout Prevention Equipment Systems for Drilling Wells. Fourth Edition. Washington: (API), American Petroleum Institute (2012).
21. FERNÁNDEZ, E. F. Y.; JUNIOR, O. A. P.; PINHO, A. C. Dicionário de petróleo em língua portuguesa. Editora Lexikon. Rio de Janeiro (2009).
22. IEC. Functional Safety of Electrical/Electronic/Programmable Electronic Safety-Related Systems, IEC 61508. International Electrotechnical Commission (IEC)(1998).
23. FARWANA, A., TAYLOR, I. Determining The Optimal Frequency of Carrying Out Well Integrity Tests. SPE Offshore Europe Conference & Exhibition, Aberdeen, UK (2015).
24. PILCH, R. Extending the Possibilities of Quantitative Determination of SIL – a Procedure Based on IEC 61508 and the Markov Model with Common Cause Failures. Quality and Reliability Engineering International, v. 33, pp. 337-346 (2017).
25. OLF (Norwegian Association of Oil Producers). Application of IEC 61508 and IEC 61511 in the Norwegian Petroleum Industry. Report OLF 070, Rev. 2, (2004).
26. C.E. EBELING, An introduction to reliability and maintainability engineering, McGraw-Hill, USA (1997).
27. WU, S.; ZHANG, L.; BARROS, A.; ZHENG, W.; LIU, Y. Performance analysis for subsea blind shear ram preventers subject to testing strategies, Reliab. Eng. Syst. Saf. 169 (2018) 281–298. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.08.022>.
28. COLOMBO, D., ABREU, D.T.M.P., MARTINS, D.E.A., DUIM, F.A. de C., MARTINS, F.B., TAMALLA, I., CARDOSO, R. Análise do impacto da frequência de testes na disponibilidade do BOP, in: ENAHPE 2019 – Encontro Nac. Construção Poços Petróleo e Gás(2019).
29. HAFVER, A., OLIVEIRA, L.F., PEDERSEN, F.B. Optimal Scheduling of Tests of Safety Systems, Considering Test-Induced Degradation, in: M. Beer, E. Zio (Orgs.), Proc. 29th Eur. Saf. Reliab. Conf., Research Publishing, Singapore. p. 4084–4090. https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3 0519-cd (2019).
30. OLF 070, The Norwegian Oil Industry Association- Application of IEC 61508 and IEC 61511 in the Norwegian Petroleum Industry (2004).