

A influência da Frequência de Testes sobre a Confiabilidade de Sistemas de Segurança – Caso do BOP Submarino

Luiz Fernando Oliveira E Joaquim Domingues
DNV GL

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo fazer uma avaliação preliminar do impacto da modificação da frequência de testes de vários componentes sobre as probabilidades de falha na demanda (PFDs) das funções de segurança de um BOP típico. Inicialmente, para efeitos de comparação, as PFDs são avaliadas considerando que os testes funcional e de pressão com o BOP instalado são feitos a cada 1 e 2 semanas (caso base), respectivamente, e que as taxas de falhas dos componentes são todas constantes no tempo. Em seguida os cálculos são refeitos considerando que os testes são feitos a cada 2 e 4 semanas e a cada 3 e 6 semanas, mantendo a distribuição exponencial para todos os componentes. Isto permite uma primeira base de comparação. As análises são então repetidas modificando as taxas de falha dos componentes sujeitos a choques de pressão durante os testes para o modelo ATSV, no qual é considerado que cada teste de pressão causa uma degradação dos componentes sujeitos ao teste, com um consequente aumento da taxa de falhas. Os resultados são apresentados em termos de variações das PFDs das funções de segurança do BOP em relação ao caso base. São feitas análises de sensibilidade em relação a alguns valores críticos de taxa de falha. Os resultados são também comparados com critérios de aceitabilidade baseados nos critérios de SIL da norma IEC 61508 utilizados pelo setor offshore na Noruega.

1. INTRODUÇÃO

Recentemente o órgão regulador americano, BSEE, alterou a frequência de testes de pressão de BOPs usados nas operações de workover e abandono de 7 para 14 dias, igualando assim à frequência de teste de pressão de BOPs durante operações de perfuração e completação [1]. Alguns setores da indústria americana pleiteavam uma mudança da frequência desses testes para 21 dias, mas este pleito não foi atendido. As razões da mudança para 14 dias e não para 21 dias não foram bem embasadas em estudos de confiabilidade, pelo menos isto não foi evidenciado na nova regulamentação de integridade de poços publicada em 2016. É sabido que a frequência de testes tem uma importante influência sobre a probabilidade de falha na demanda (PFD) de sistemas de segurança, mas será que a mudança (ou a não mudança) acima é justificada para um sistema como o BOP do ponto de vista da segurança operacional? Sabe-se também que no caso deste equipamento, o teste de pressão pode causar danos a vários componentes [1] devido à grande variação de pressão a que são submetidos durante os testes. Esses pontos são tratados neste trabalho.

2. OBJETIVOS DO TRABALHO

O principal objetivo deste trabalho consiste em fazer uma avaliação preliminar do impacto da modificação da frequência de testes de vários componentes sobre as probabilidades de falha na demanda (PFDs) das funções de segurança de um BOP típico. Inicialmente para efeitos de comparação as PFDs são avaliadas considerando que os testes funcional e de pressão com o BOP instalado são feitos a cada 1 e 2 semanas, respectivamente, e que as taxas de falhas dos componentes são todas constantes no tempo (distribuição exponencial). Em seguida os cálculos são refeitos considerando que os testes são feitos a cada 2 e 4 semanas e a cada 3 e 6 semanas, mantendo todas as taxas de falhas de acordo com o modelo exponencial. Isso permite que seja feita uma primeira comparação das PFDs considerando apenas a variação nas frequências dos referidos testes, mantendo sempre a relação do dobro do intervalo entre os testes funcionais e os de pressão.

As avaliações são então repetidas modificando as taxas de falha dos componentes sujeitos a degradação (causada pelos testes pressão) para o modelo ATSV (“Additive Test Step Varying”) recentemente publicado [2], no qual é considerado que cada teste de pressão causa um aumento percentual fixo da taxa de falhas inicial. No modelo ATSV [2] um número máximo de testes para cada componente é estabelecido, devendo o componente degradado ser trocado por um novo quando este número máximo é atingido. As análises são feitas considerando que alguns componentes são submetidos a níveis múltiplos de testes incompletos, teoria também recentemente desenvolvida [3], e que o BOP é recertificado a cada 5 anos,

momento no qual considera-se que ocorra uma renovação total de todos os componentes.

Os resultados são apresentados em termos de variações das PFDs das funções de segurança do BOP em relação ao caso base (testes funcional e de pressão a cada 1 e 2 semanas com taxas de falhas exponenciais). São feitas algumas análises de sensibilidade em relação a alguns valores críticos de taxa de falha do modelo ATSV, que são o parâmetro de aumento percentual da taxa de falha a cada teste de pressão e também o número máximo de testes de pressão após o qual os componentes degradados são substituídos por novos.

Os resultados obtidos são comparados com critérios de aceitabilidade baseados nos critérios de SIL da norma IEC 61508 [4] utilizados pela indústria offshore da Noruega [5].

Considerando que a confiabilidade do BOP está diretamente ligada não apenas à frequência de teste, mas também à configuração do mesmo (nível de redundância das gavetas, principalmente), do ponto de vista da segurança operacional, a frequência de testes não deveria ser igual para todos os BOPs, mas sim variar de acordo com a configuração de cada BOP. Uma frequência única de teste (regra prescritiva) penaliza bastante o operador que possui um BOP com um alto nível de redundância (mais confiável) em relação a outro com um BOP com baixo nível de redundância. Não apenas o primeiro será obrigado a testar com a mesma frequência, mas também terá que testar muito mais componentes do que o segundo.

Neste trabalho não são discutidas as questões de custo operacional decorrente das modificações na frequência de testes, mas certamente, este é um fator que pode ter um impacto significativo no custo global das operações de perfuração. BSEE estimou que a redução potencial no custo operacional no Golfo do México com a mudança de 14 para 21 dias para a frequência de testes de pressão seria da ordem de 400 milhões de dólares por ano [1].

3. DESCRIÇÃO DO BOP E SUAS FUNÇÕES DE SEGURANÇA

O BOP é um dos equipamentos de segurança do sistema de controle do poço, o qual é constituído de um conjunto de válvulas que permite fechar o poço sempre que ocorrer um *kick*. Se o fluxo indesejado de fluido da formação para o poço não for controlado e o BOP falhar, poderá ocorrer um *blowout*, o qual pode causar danos parciais ou totais aos equipamentos da sonda, acidentes pessoais, perda do poço e danos ambientais. Historicamente, tais incidentes causaram danos ao ambiente, perda de vidas e teve impacto econômico significativo para os operadores envolvidos, tais como o *blowout* da plataforma Deepwater Horizon no campo Macondo [6].

O BOP é composto de preventores de anular, gaveta de tubo e gaveta cega cisalhante. O preventor de anular tem por função fechar o espaço anular do poço. Ele é constituído de um pistão que, ao ser deslocado dentro de um corpo cilíndrico, comprime um elemento de borracha que se ajusta contra a tubulação que esteja dentro do poço. A gaveta de tubo também pode fechar o espaço anular do poço através da ação de dois pistões acionados hidráulicamente, que deslocam duas gavetas, uma contra a outra, transversalmente ao eixo do poço. A gaveta cega cisalhante deve cortar a tubulação no interior do poço e fechar todo o poço.

O BOP pode ter vários arranjos de preventores e gavetas. Nas sondas flutuantes, em que o BOP é instalado no fundo do mar, normalmente são usados dois preventores de anular e três ou quatro gavetas de tubo e uma ou duas gavetas cegas cisalhantes. O arranjo mínimo do BOP de sonda flutuante, da base para o topo, contém os seguintes elementos [7]:

- 1) Conector hidráulico compatível com a cabeça do poço.
- 2) Gaveta de tubo
- 3) Gaveta de tubo
- 4) Gaveta de tubo
- 5) Gaveta cega cisalhante
- 6) Conector hidráulico
- 7) Preventor de anular com pressão de trabalho maior ou igual a 50% da pressão de trabalho do preventor gaveta.
- 8) Junta flexível que permita deflexão relativa entre o BOP e a coluna de *riser* de até 10 graus.

O BOP deve ter pressão de trabalho compatível com a do projeto do poço e deve ser especificado para trabalhar com H₂S. A pressão de trabalho do BOP é balizada pela pressão de trabalho do preventor gaveta. Ele deve cortar o tubo de perfuração mais resistente da coluna de perfuração ou de trabalho no poço. Em sondas de posicionamento dinâmico, a gaveta cega cisalhante deve cortar os revestimentos previstos do poço. Quando houver previsão de operar sem margem de segurança de *riser*, o BOP deve possuir duas gavetas cegas cisalhantes, sendo que a gaveta inferior deve cortar os revestimentos previstos e pode ser substituída por uma gaveta de corte de revestimento [7].

As funções relevantes de segurança do BOP durante a operação de perfuração de poço submarino visam o fechamento das válvulas do BOP, a fim de evitar blowouts do poço. O documento OLF-070 [5] define as seguintes funções de segurança para o BOP:

1. Cortar o tubo de perfuração e selar o poço
2. Selar em torno do tubo de perfuração
3. Selar o poço sem tubo de perfuração (orifício aberto)

Para a execução da função 1, o tubo de perfuração deve ser cortado antes que o poço possa ser vedado. Não é prática da indústria testar regularmente esta função devido ao fato de ser um teste destrutivo, sendo todos os testes funcionais realizados com o orifício aberto (sem tubo de perfuração). O teste de corte do tubo de perfuração é realizado normalmente durante os testes de aceitação de fábrica do BOP. Como a gaveta cega cisalhante não corta normalmente as conexões cônicas (*tool joints*) dos tubos de perfuração, é necessário o controle adequado da posição da coluna de perfuração para que a operação de corte do tubo de perfuração seja bem-sucedida.

A função 2 é a mais comumente usada e é executada por preventores de anular e por gavetas de tubo. As gavetas de tubo podem ser fixas ou variáveis. Podem existir limitações para as gavetas de tubo fixas funcionarem corretamente, como por exemplo, fechar em torno de comandos (*drill collars*), conexões cônicas (*tool joints*), canhões (*perforation guns*), etc. Para selagem do anular usando os preventores de anular ou as gavetas de tubo, a coluna de perfuração também deve ser fechada na superfície ou lama deve ser aplicada para controlar a pressão do reservatório.

A função 3 é executada pela gaveta cega cisalhante para selar o poço. Se ocorrer um vazamento, existe a possibilidade de encaminhar um tubo no poço e fechar o anular em torno do tubo. A gaveta cega cisalhante pode então ser aberta e o tubo pode ser inserido ainda mais, de modo que as gavetas de tubo também possam ser usadas.

Na Referência [5], a função de integridade de segurança (SIL – Safety Integrity Level) relacionada ao fechamento do poço foi restrita ao fechamento das válvulas e não inclui o corte real do tubo de perfuração. As funções 1 e 3 podem assim ser combinadas, isto é, fechamento da gaveta cega cisalhante. O nível de SIL mínimo requerido para o isolamento do anular pelos preventores anular ou pelas gavetas de tubo deve ser SIL 2 ($1.0e-02 > PFD > 1.0e-03$), sendo este também o nível de SIL mínimo requerido para fechamento do poço pela gaveta cega cisalhante.

Para se estudar o efeito da redundância sobre as PFDs das funções de segurança do BOP, neste trabalho foram considerados dois arranjos de BOP. O primeiro possui 3 gavetas de tubo, uma gaveta cisalhante de revestimento, uma gaveta cega cisalhante e dois preventores de anular (vide Figura 1). O segundo possui 3 gavetas de tubo, uma gaveta cisalhante de revestimento, duas gavetas cegas cisalhantes e dois preventores de anular (vide Figura 2). Conforme indicado nestas figuras, o BOP pode ter três mecanismos para atuação das suas funções de segurança:

- Atuação através dos painéis de controle do sondador (*driller*) ou do operador de ferramenta (*toolpusher*);
- Função de Modo Automático (*AMF - Automatic Mode Function*); e
- Sistema acústico.

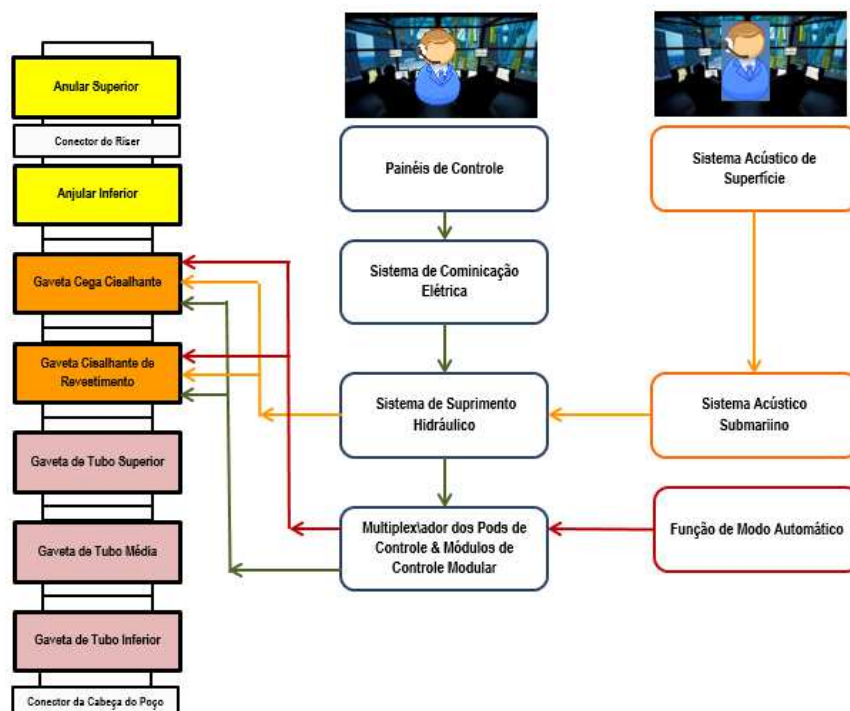


Figura 1 - Arranjo de BOP com Uma Gaveta Cega Cisalhante e uma Gaveta de Corte de Revestimento

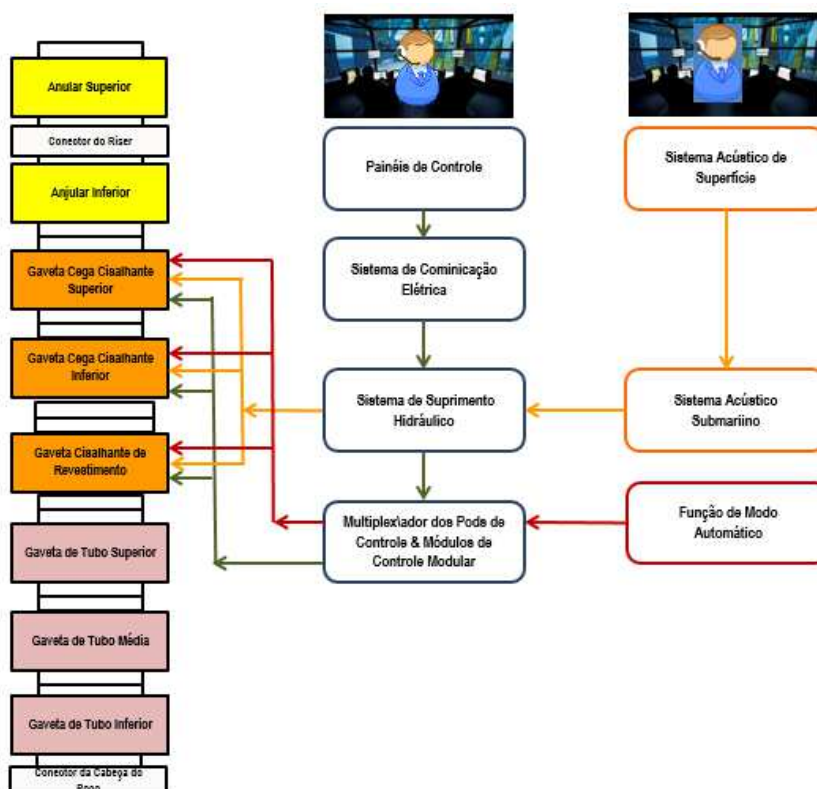


Figura 2 - Arranjo de BOP com Duas Gavetas Cegas Cisalhantes e uma Gaveta de Corte de Revestimento

4. MODELAGEM DA CONFIABILIDADE DAS FUNÇÕES DE SEGURANÇA

4.1. Modelagem do Caso Base

Para o caso base de referência é considerado que todos os componentes do BOP tenham taxas de falhas com distribuição exponencial e que alguns deles sejam submetidos a até quatro níveis de testes: semanal, bissemanal, trimestral e quinquenal, sendo este último nível o correspondente à recertificação do BOP. Na recertificação do BOP é considerado que o teste seja completo eliminando todas as falhas existentes (fator de cobertura igual a 1), de modo que a PFD seja igual a zero após o teste. Os demais testes são parciais e possuem fatores de cobertura menores do que um.

4.2. Dados de Falha Utilizados

Os dados de falhas dos componentes do BOP usados neste trabalho foram obtidos principalmente das seguintes fontes:

1. SINTEF PDS 2013 [8],
2. Oreda Subsea Control Systems, 2009 [9],
3. Exprosoft, 2012 [10].

Nesta análise estão sendo consideradas apenas os modos de falhas perigosos, não sendo considerados os modos de falhas seguros, mas a contribuição desses últimos é em geral muito pequena comparada à das falhas perigosas.

4.3. Modelagem dos Casos Alternativos para Fins de Comparação

Para avaliar a influência da variação do intervalo entre testes com o BOP instalado, os testes a cada 1 e 2 semanas do caso base foram alterados para a cada 2 e 4 semanas e para a cada 3 e 6 semanas. Os demais, ou seja, o trimestral e o quinquenal continuaram com a mesma frequência. Nestes casos, todas as taxas de falha permanecem com a distribuição exponencial, de modo que o único efeito estudado é o da extensão dos dois primeiros níveis de teste (o de pressão e o funcional). Procurou-se manter sempre o fator de 2 entre esses dois níveis de teste, de modo a manter sempre a mesma rotina operacional dos testes, variando-se apenas o tempo entre os testes.

Para avaliar o efeito das possíveis degradações causadas pelos testes de pressão sobre as PFDs dos componentes sujeitos a este tipo de teste, foi utilizado o modelo aditivo de taxa de falhas variando por degrau a cada teste de pressão (ATSV – *Additive Test Step Varying*) [2]. As equações deste modelo para até quatro níveis de teste estão fornecidas na Ref. [2]. Como o incremento da taxa de falhas devido ao teste de pressão é um parâmetro ainda desconhecido, foi feita uma análise de sensibilidade considerando-se os seguintes percentuais de aumento: 1%, 2% e 5%. Além disso, é considerado que no caso base o teste de pressão ocorre a cada 2 semanas (teste bissemanal), enquanto nos demais casos, o teste de pressão é feito a cada 4 semanas (no segundo caso) e a cada 6 semanas (no terceiro caso). O modelo ATSV foi usado para as taxas de falhas de preventores, gavetas, conectores, válvulas alternadoras (*shuttle valves*) dos preventores, das gavetas e dos conectores, reguladores de pressão, válvulas dos canais (*conduit valve package*), linhas dos canais e válvulas do sistema acústico. Para os demais componentes foi mantida a distribuição exponencial.

Ainda nos casos do Modelo ATSV, foi considerado que os componentes sujeitos a degradação pelo teste de pressão sejam substituídos a cada 52 testes de pressão. Para avaliar o impacto da substituição, foi feita uma análise de sensibilidade para o modelo ATSV, aumentando-se o número de ciclos para substituição de 52 para 200 ciclos. Neste último caso, não haverá substituição dos componentes durante o período de 5 anos entre recertificações.

4.4. Modelagem para Avaliação das PFDs

Para obtenção dos resultados foi utilizada a ferramenta BOP RDT – BOP Retrieval Decision Tool, a qual utiliza árvores de falhas e modelos dependentes do tempo para avaliação da probabilidade de falha na demanda das funções de segurança do BOP [1]. Foram construídas árvores de falhas com alto nível de detalhamento (cerca de 300 eventos básicos cada) para as duas configurações de BOP indicadas nas Figuras 1 e 2. Foram avaliados os valores médios no intervalo de recertificação (5 anos) das PFDs de duas funções de segurança para as duas configurações de BOP:

1. SF1 - Cortar o tubo de perfuração e selar o poço - Corte pela gaveta cega cisalhante ou pela gaveta cisalhante de revestimento e fechamento e travamento pela gaveta cega cisalhante.

2. SF2 - Selar em torno da coluna de perfuração – Fechamento dos preventores de anular ou das gavetas de tubo.

Essas são exatamente as funções indicadas no documento da indústria offshore norueguesa [5] e estão devidamente explicadas na Seção 3.

5. RESULTADOS OBTIDOS

5.1. BOP com Uma Gaveta Cega Cisalhante

A Figura 3, a Figura 4 e a Figura 5 ilustram, para a distribuição exponencial, o comportamento temporal das PFDs da SF 1 em um intervalo típico de duração de uma campanha de perfuração e os valores médios e máximos, para o caso base do BOP com uma gaveta cega cisalhante com intervalo entre testes de 1 e 2 semanas, 2 e 4 semanas e 3 e 6 semanas, respectivamente. Daqui para frente nos referiremos apenas ao número de gavetas cegas cisalhantes (uma ou duas), sendo os arranjos completos de cada um dos dois BOPs indicados nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Conforme indicado na parte inferior das figuras 3 a 5, para o caso dos testes a cada 1 e 2 semanas o valor médio no período de recertificação de 5 anos é de $5,98\text{e-}03$; para os testes a cada 2 e 4 semanas este valor aumenta para $7,77\text{e-}03$; para os testes a cada 3 e 6 semanas o valor alcança $9,56\text{e-}03$. Observa-se que para o caso de teste a cada 3 e 6 semanas, a PFD média durante o período de recertificação aumenta cerca de 60% em relação ao caso base e fica próxima do limite de SIL 2, mas ainda ligeiramente abaixo dele. Assim, mesmo no caso do maior intervalo (3 e 6 semanas), o BOP com uma gaveta cega cisalhante ainda satisfaria a regra do SIL requerido igual a 2 proposta na Referência [5].

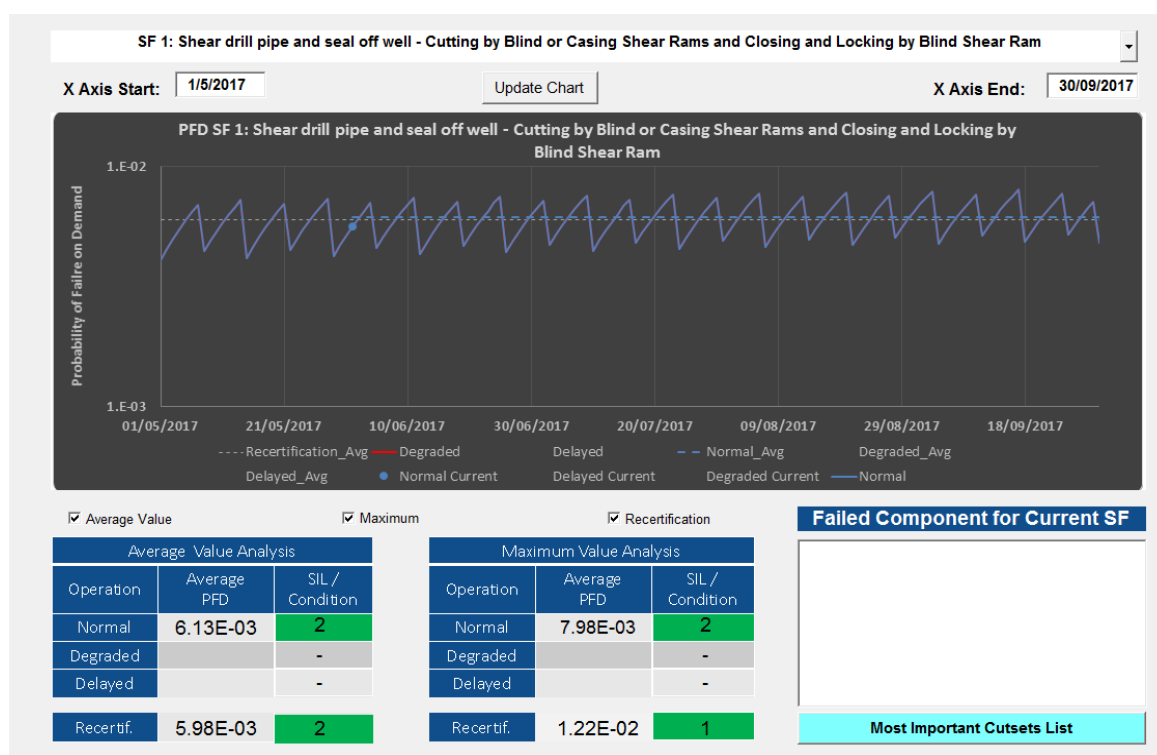


Figura 3 - PFD da SF1 para BOP com uma Gaveta Cega Cisalhante e Testes a cada 1 e 2 Semanas.

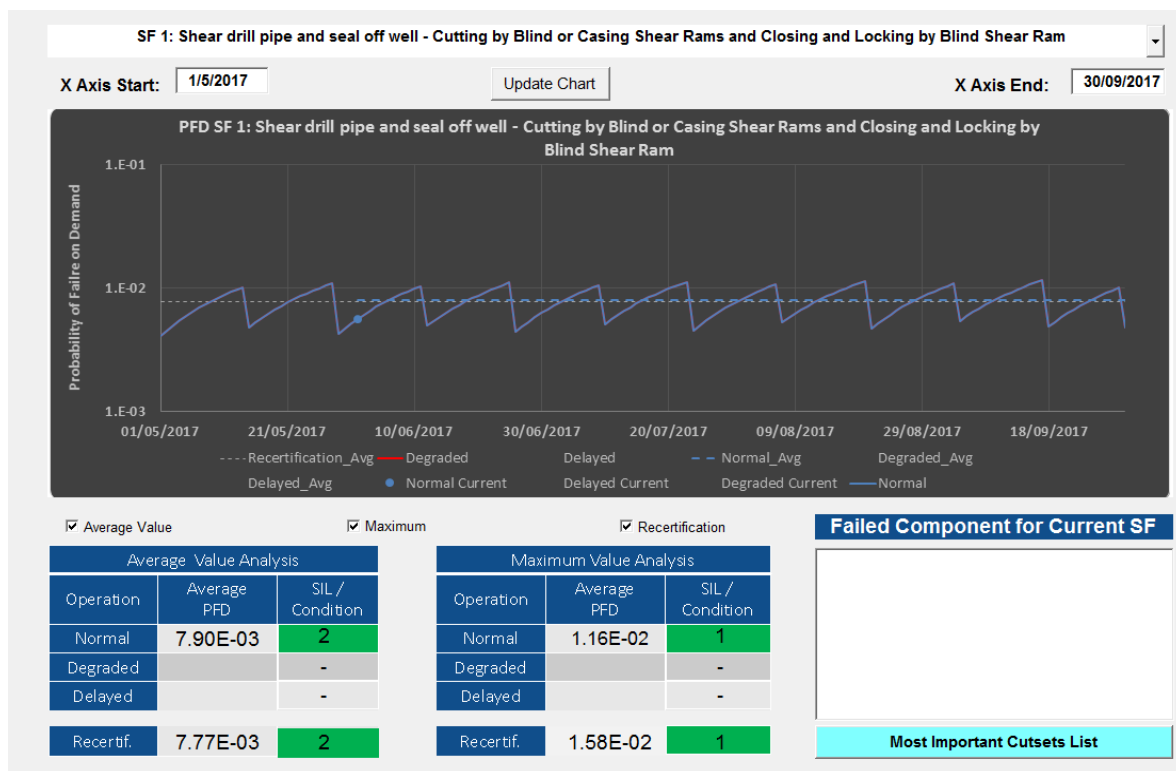


Figura 4 - PFD da SF1 para BOP com uma Gaveta Cega Cisalhante e Testes a cada 2 e 4 Semanas.

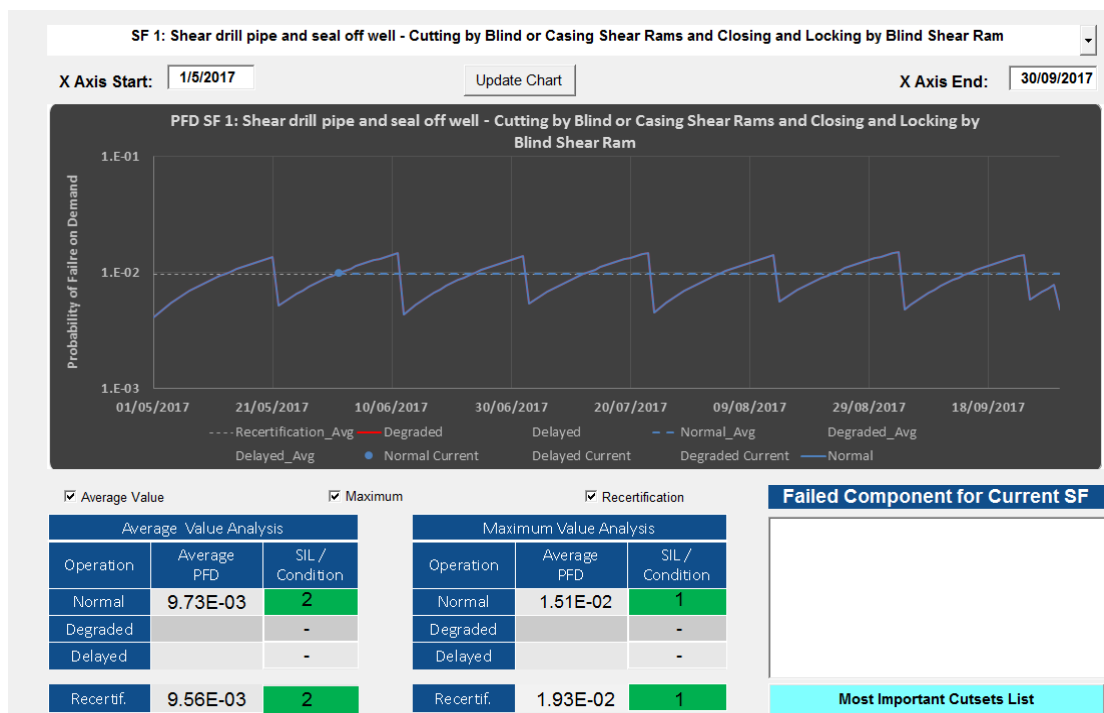


Figura 5 - PFD da SF1 para BOP com uma Gaveta Cega Cisalhante e Testes a cada 3 e 6 Semanas.

A Tabela 1 apresenta os valores médios das PFDs para as funções de segurança 1 e 2 do BOP configurado com apenas uma gaveta cega cisalhante. Todos os valores médios são tomados em relação ao intervalo de recertificação de 5 anos. Os resultados indicam que:

- Para a distribuição exponencial, a PFD média da SF 1 se aproxima do limite de SIL 2 apenas para o teste a cada 3 e 6 semanas, ficando ainda ligeiramente abaixo do limite;
- No caso de distribuição ATSV com 1% de incremento e testes a cada 3 e 6 semanas, o valor da PFD média da SF 1 ultrapassa ligeiramente o limite de SIL 2, ficando em 1.1E-02 (marcado em vermelho

na tabela);

- Para os casos de distribuição ATSV com 2% ou 5% de incremento, todos os valores ficam acima do limite de SIL2 (indicados em vermelho na tabela), exceto para o caso de 2% e testes a cada 1 e 2 semanas (8.7E-03).

Tabela 1 - Valores Médios das PFDs das SF 1 e 2 para BOP com uma Gaveta Cega Cisalhante

Caso*	Distribuição	Incremento (%)	Intervalo de Teste (semanas)	PFD Média da SF1	PFD Média da SF2
Exp_T12	Exponencial	-	1 e 2	6.0E-03	2.5E-04
Exp_T24	Exponencial	-	2 e 4	7.8E-03	3.0E-04
Exp_T36	Exponencial	-	3 e 6	9.6E-03	3.6E-04
AS1_T12	ATSV	1	1 e 2	7.4E-03	3.1E-04
AS1_T24	ATSV	1	2 e 4	9.4E-03	3.7E-04
AS1_T36	ATSV	1	3 e 6	1.1E-02	4.3E-04
AS2_T12	ATSV	2	1 e 2	8.7E-03	3.7E-04
AS2_T24	ATSV	2	2 e 4	1.1E-02	4.4E-04
AS2_T36	ATSV	2	3 e 6	1.3E-02	5.0E-04
AS5_T12	ATSV	5	1 e 2	1.3E-02	5.8E-04
AS5_T24	ATSV	5	2 e 4	1.6E-02	6.7E-04
AS5_T36	ATSV	5	3 e 6	1.9E-02	7.4E-04

* Nota: AS1_T12 significa: Modelo ATSV com 1% de aumento por teste e intervalos entre testes de 1 semana (para os testes de pressão) e 2 semanas (para os testes funcionais). A mesma nomenclatura se aplica para as demais linhas.

As Figuras 6 e 7 permitem comparar, para as SF1 e SF2 respectivamente, o aumento do valor da PFD média dos vários casos em relação ao caso base (distribuição exponencial e testes a cada 1 e 2 semanas). As colunas azul e amarelo representam os diferentes valores para os dois casos de substituição do componente degradado, 52 ciclos e 200 ciclos (neste último caso, a recertificação ocorre antes da substituição dos componentes. Observa-se destas figuras que no caso de distribuição exponencial, a PFD média sempre aumenta com o aumento do intervalo entre testes, como era de se esperar. Não há diferença entre os valores do número de ciclos de substituição, pois isso não se aplica para a distribuição exponencial.

Nos casos da distribuição ATSV, a cada teste de pressão a PFD média aumenta em relação àquela da distribuição exponencial de acordo com o percentual de aumento considerado para a taxa de falha em cada teste de pressão para os mesmos intervalos entre testes. No entanto, o aumento da PFD média devido aos testes de pressão mais frequentes sofre uma certa compensação devido ao efeito da substituição dos componentes a cada 52 testes de pressão (barras azuis). É importante ressaltar que, no caso do modelo ATSV, o aumento do intervalo entre testes tem dois efeitos opostos: aumenta a PFD média devido ao maior tempo entre testes, porém reduz a PFD média devido ao menor número de choques (degradação) causados pelos testes de pressão. O relacionamento entre esses dois efeitos fica claramente visível para o caso dos valores mais altos do parâmetro de aumento (no nosso caso, 5%) e quando não ocorre substituição do componente no intervalo de recertificação. Esses casos correspondem às barras amarelas e rosas no interior dos ovais em vermelho nas Figuras 6 e 7, mas também podem ser notados mesmo nos casos de parâmetro de aumento igual a 2%.

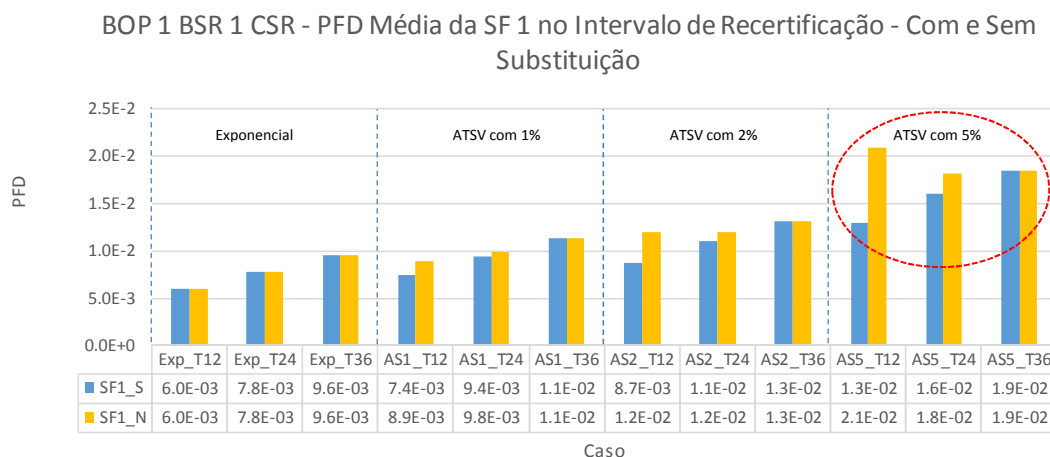


Figura 6 - BOP com 1 BSR: Variação da PFD Média da SF1 com o Intervalo de Teste e com o Percentual de Incremento da Taxa de Falhas Com e Sem Substituição

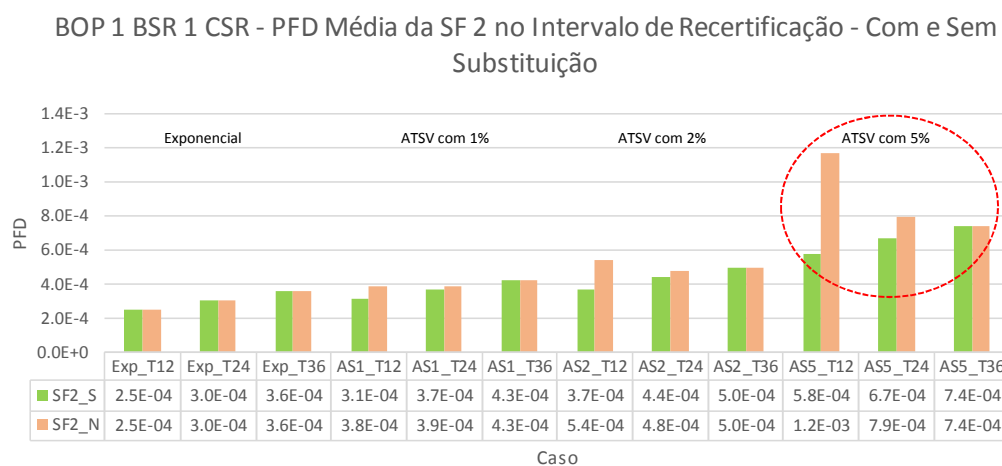


Figura 7 - BOP com 1 BSR: Variação da PFD Média da SF2 com o Intervalo de Teste e com o Percentual de Incremento da Taxa de Falhas Com e Sem Substituição

Nos casos da distribuição ATSV sem substituição, a PFD média aumenta mais do que no caso com substituição e para o percentual de 5%, o aumento do intervalo entre testes causa redução da PFD média uma vez que é reduzido o número de testes de pressão durante o intervalo de recertificação com o aumento do intervalo entre testes de pressão. No caso do percentual de 2%, a PFD varia pouco com o aumento do intervalo entre testes. No caso de percentual de 1%, a PFD média aumenta com o aumento do intervalo entre testes. Portanto, o comportamento da PFD média depende do valor do parâmetro de aumento da taxa de falhas causado pelo teste de pressão (parâmetro de aumento percentual no Modelo ATSV). Se o aumento for pequeno, estender o intervalo entre testes causa aumento da PFD. Porém se o aumento for grande, estender o intervalo entre testes causa redução da PFD. As Figuras 8 e 9 mostram a contribuição para a PFD média devido ao intervalo entre testes e devido ao teste de pressão para o caso sem substituição.

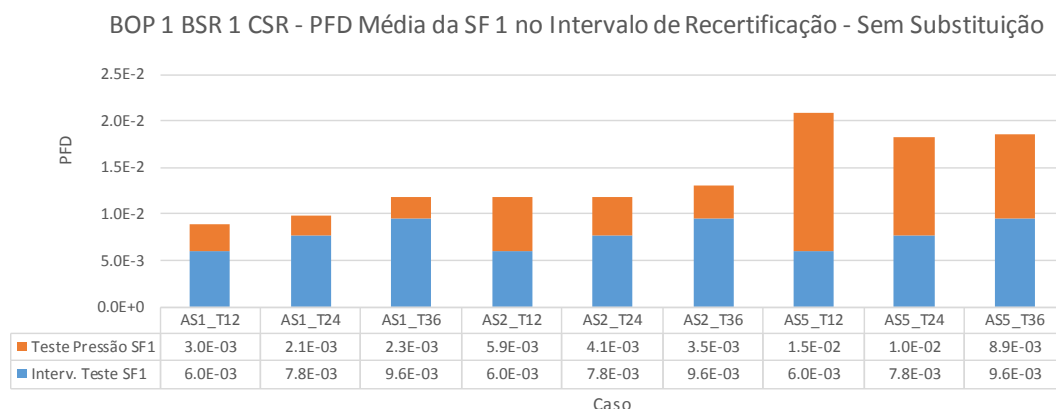


Figura 8 - BOP com 1 BSR: Variação da Contribuição do Intervalo entre Testes e do Teste de Pressão para Distribuição Degrau Aditivo Sem Substituição para SF1

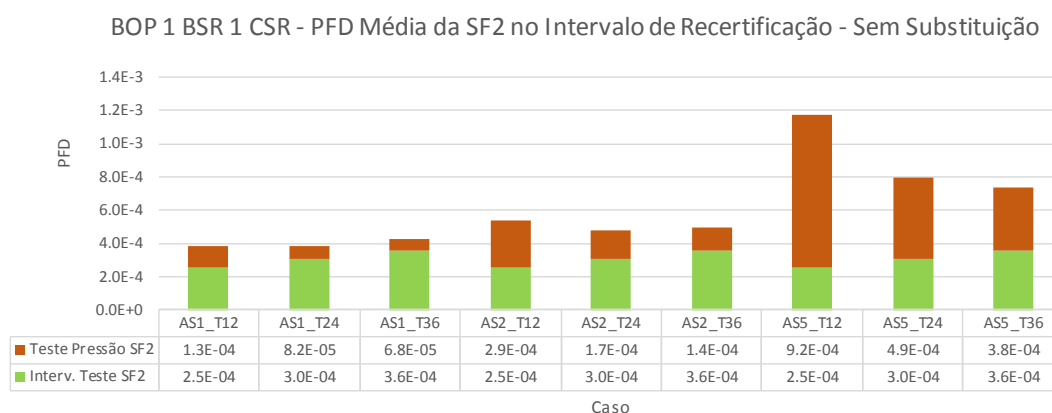


Figura 9 - BOP com 1 BSR: Variação da Contribuição do Intervalo entre Testes e do Teste de Pressão para Distribuição Degrau Aditivo Sem Substituição para SF2

5.2. BOP com Duas Gavetas Cegas Cisalhantes

Os valores das PFDs das duas funções de segurança para o BOP com duas gavetas cegas cisalhantes estão mostrados na Tabela 2 para as mesmas condições analisadas nas seções anteriores. Pode-se ver que neste caso, todos os valores das PFDs satisfazem ao critério de SIL 2 usado na Noruega [5]. Na realidade, todos os valores da Tabela 2 satisfazem ao critério de SIL 3, com exceção do caso do modelo ATSV com testes a cada 1 e 2 semanas e sem substituição dos componentes degradados dentro do período de recertificação de 5 anos. Portanto, pode-se concluir que os intervalos entre testes poderiam ainda ser mais espaçados do que os máximos considerados neste trabalho sem que houvesse comprometimento do critério de atendimento ao SIL requerido igual a 2. Desta forma, fica evidente que a adoção de uma regra prescritiva para a frequência de testes, independentemente da configuração do BOP não é adequada, pois penaliza em muito os operadores que estão investindo em um BOP com uma configuração com duas gavetas cegas cisalhantes em relação aos que estão trabalhando com um BOP com apenas uma gaveta cega cisalhante.

Nos Estados Unidos, pela nova regra de controle de poço [1], todos os operadores terão que instalar uma segunda gaveta cega cisalhante a partir de 2019. Esta já era uma recomendação prevista na versão mais recente da norma API 53 [12] e que está sendo inserida na regulamentação americana. No entanto, nem por isso, BSEE está atendendo à solicitação de aumento da frequência de testes de pressão para 21 dias como solicitado pela indústria. Segundo informações recentes fornecidas no website [13], esta condição poderá vir a ser alterada em breve, pois BSEE está buscando mais subsídios para rever alguns pontos da regra, incluindo esta questão do aumento da frequência de testes de pressão de 14 para 21 dias.

Tabela 2 - Valores Médios das PFDs das SF 1 e 2 para BOP com Duas Gavetas Cegas Cisalhantes

Caso*	Distribuição	Incremento (%)	Intervalo de Teste	PFD Média da SF1	PFD Média da SF2
Exp_T12	Exponencial	-	1 e 2	1.4E-04	2.5E-04
Exp_T24	Exponencial	-	2 e 4	1.8E-04	3.0E-04
Exp_T36	Exponencial	-	3 e 6	2.3E-04	3.6E-04
AS1_T12	ATSV	1	1 e 2	1.8E-04	3.1E-04
AS1_T24	ATSV	1	2 e 4	2.4E-04	3.7E-04
AS1_T36	ATSV	1	3 e 6	3.0E-04	4.3E-04
AS2_T12	ATSV	2	1 e 2	2.4E-04	3.7E-04
AS2_T24	ATSV	2	2 e 4	3.1E-04	4.4E-04
AS2_T36	ATSV	2	3 e 6	3.9E-04	5.0E-04
AS5_T12	ATSV	5	1 e 2	4.6E-04	5.8E-04
AS5_T24	ATSV	5	2 e 4	6.0E-04	6.7E-04
AS5_T36	ATSV	5	3 e 6	7.4E-04	7.4E-04
AS1_T12_N	ATSV	1	1 e 2	2.6E-04	3.8E-04
AS1_T24_N	ATSV	1	2 e 4	2.6E-04	3.9E-04
AS1_T36_N	ATSV	1	3 e 6	3.0E-04	4.3E-04
AS2_T12_N	ATSV	2	1 e 2	4.3E-04	5.4E-04
AS2_T24_N	ATSV	2	2 e 4	3.6E-04	4.8E-04
AS2_T36_N	ATSV	2	3 e 6	3.9E-04	5.0E-04
AS5_T12_N	ATSV	5	1 e 2	1.3E-03	1.2E-03
AS5_T24_N	ATSV	5	2 e 4	8.0E-04	7.9E-04
AS5_T36_N	ATSV	5	3 e 6	7.4E-04	7.4E-04

* A nomenclatura desta tabela é igual à da Tabela 1. As linhas com a letra N que os cálculos são feitos sem a consideração de substituição no intervalo de recertificação (5 anos).

6. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho foi feita uma avaliação preliminar do impacto da modificação da frequência de testes de vários componentes sobre as probabilidades de falha na demanda (PFDs) das funções de segurança de um BOP típico. Inicialmente para efeitos de comparação as PFDs foram avaliadas considerando que os testes funcional e de pressão com o BOP instalado são feitos a cada 1 e 2 semanas (caso base), respectivamente, e que as taxas de falhas dos componentes são todas constantes no tempo (distribuição exponencial). Em seguida os cálculos foram refeitos considerando que os testes são feitos a cada 2 e 4 semanas e a cada 3 e 6 semanas, mantendo todas as taxas de falhas de acordo com o modelo exponencial. As avaliações foram repetidas modificando as taxas de falha dos componentes sujeitos a degradação (causada pelos testes pressão) para o modelo ATSV [2].

Para o BOP configurado com apenas uma gaveta cega cisalhante, os resultados indicaram que mesmo com o aumento dos intervalos entre testes para 3 e 6 semanas, a PFD média da função de segurança SF1 fica próxima, mas ainda se mantém dentro do limite de SIL 2 para as taxas de falhas com o modelo exponencial adotadas neste trabalho. Os resultados para a SF2 ficam todos na faixa de SIL 3.

No caso de distribuição ATSV com 1% de incremento e testes a cada 3 e 6 semanas com substituição dos componentes degradados após 52 testes, o valor da PFD média da SF 1 ultrapassa ligeiramente o limite de SIL 2, ficando em 1,1E-02. Para os casos com 2% ou 5% de incremento, todos os valores ficam acima do limite de SIL2, exceto para o caso de 2% e testes a cada 1 e 2 semanas (8,7E-03).

É verificado que o comportamento da PFD média depende do valor do parâmetro de aumento da taxa de falhas causado pelo teste de pressão (parâmetro de aumento percentual no Modelo ATSV). Se o aumento for pequeno, estender o intervalo entre testes causa aumento da PFD média. Porém se o aumento for grande, o aumento do intervalo entre testes causa redução da PFD média. Este efeito é atenuado por uma política de substituição dos componentes degradados após um número de testes não muito alto. De qualquer forma, é

interessante que trabalhos de pesquisa sejam feitos para se avaliar a extensão da degradação real causada pelos testes de pressão sobre alguns componentes e seus efeitos sobre a taxa de falhas desses componentes.

Os resultados obtidos para o caso do BOP configurado com duas gavetas cegas cisalhantes mostraram que para todos os intervalos entre testes avaliados neste trabalho (de 1 a 6 semanas) os valores das PFDs das duas funções de segurança satisfazem ao critério de SIL 2 usado na Noruega [5]. Na realidade, todos os valores obtidos satisfazem até mesmo ao critério de SIL 3, com exceção do caso do modelo ATSV com testes a cada 1 e 2 semanas e sem substituição dos componentes degradados dentro do período de recertificação de 5 anos que fica um pouco acima do limite de SIL 3. Portanto, pode-se concluir que para essa configuração de BOP os intervalos entre testes poderiam ainda ser mais espaçados do que os máximos considerados neste trabalho sem que houvesse comprometimento do critério de atendimento ao SIL requerido igual a 2.

Fica evidente, portanto, que a adoção de uma regra prescritiva para a frequência de testes, independentemente da configuração do BOP, não é adequada, pois penaliza em muito os operadores que estão investindo em um BOP com uma configuração com duas gavetas cegas cisalhantes em relação aos que estão trabalhando com um BOP com apenas uma gaveta cega cisalhante. Não apenas o primeiro será obrigado a testar desnecessariamente com a mesma frequência, mas também terá que testar muito mais componentes do que o segundo. Portanto, a nossa proposta é que a exigência para a frequência de testes de BOP seja baseada em performance (por exemplo, baseada no nível de confiabilidade operacional desejada) e não em uma política prescritiva com uma frequência fixa aplicável a todas as configurações de BOP.

7. REFERÊNCIAS

- [1] BSEEE, Final Rule “Oil and Gas and Sulfur Operations in the Outer Continental Shelf-Blowout Preventer Systems and Well Control”, *Federal Register*, Vol. 83, Nº81, Part III, 30 CFR Part 250.737 (April 29, 2016).
- [2] Oliveira, L.F., Domingues, J., Hafver, A., and Pedersen, F. B., “Evaluation of PFD of Safety Systems with Time-Dependent and Test Step-Varying Failure Rates”, ESREL 2016, Glasgow, UK.
- [3] Eisinger, S., Oliveira, L.F., Chame, L., Domingues, J., “Reliability Analysis of Safety Systems Subject to Multiple Testing Levels”, ESREL 2015, Zurich, Switzerland.
- [4] IEC (International Electrotechnical Commission), “Functional Safety of Electrical/Electronic/-Programmable Electronic Safety-related Systems”, International Electrotechnical Commission, IEC 61508, Rev.1, Geneva, Switzerland, 2010.
- [5] The Norwegian Oil Industry Association, “Norwegian Oil and Gas Application of IEC 61508 And IEC 61511 in the Norwegian Petroleum Industry”, OLF-070 rev. 2, 2004.
- [6] National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, “*Deepwater: The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling*, Report to the President, 2011.
- [7] PETROBRAS, “Recursos Críticos em Segurança de Poço: Equipamentos e Capacitação Pessoal”, Norma N-2753 rev. B, 2012.
- [8] SINTEF, *Reliability Data for Safety Instrumented Systems*, 2013.
- [9] OREDA, “*Offshore Reliability Data Handbook*”, 5ª. Edição, Volumes 1 &2, DNV GL, 2013.
- [10] Exprosoft, *Reliability of Deepwater Subsea BOP Systems and Well Kicks*, 2012
- [11] Oliveira, L.F., Domingues, J., Rocha, G., “*Reliability Models for Real-Time Monitoring: Application to the Case of a Subsea BOP*”, PSAM-13 2016, Seoul, Korea.
- [12] American Petroleum Institute, “Blowout Prevention Equipment for Drilling Wells”, API Standard 53, 4th Ed. (2016).
- [13] Ver notícia no site <https://www.bsee.gov/guidance-and-regulations/regulations/well-control-rule> , consultado em 06/11/17