Produto & Produção, vol 17 n 2, p 71-89, 2016

RECEBIDO EM 14/05/2016. ACEITO EM 19/06/2016.

Pedro Henrique Grechi

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS

pedrogrechi@gmail.com.br

André Luiz Rocha Alves

Petrobras

Estudo comparativo entre Sistemas Submarinos de Isolamento (SSIS) com Válvulas Submarinas de Isolamento (SSIV) do tipo esfera e gaveta

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre a confiabilidade de sistemas submarinos de isolamento (SSIS's) que utilizam válvulas do tipo esfera e gaveta como válvula submarina de isolamento (SSIV) dos sistemas. Para isso, os sistemas foram equacionados com a utilização do método de árvores de falhas e foram levantados gráficos baseados em dados de taxas de falhas (λ), obtidos nas referências citadas, para diferentes situações de operação. Durante o desenvolvimento são explorados conceitos importantes como o de confiabilidade e disponibilidade, o método árvore de falhas, o incidente de Piper-Alpha, o que são os sistemas submarinos de isolamento e a importância dos mesmos na indústria de óleo e gás. Em sua conclusão, o trabalho demonstra a maior confiabilidade de sistemas que utilizam a válvula esfera como válvula de isolamento nos sistemas e o impacto da realização ou não de testes na disponibilidade dos sistemas.

Palavras-chave: Sistema submarino de isolamento; Válvula submarina de isolamento; Confiabilidade.

ABSTRACT

This paper presents a comparative study of the reliability of the subsea isolation systems (SSIS) using ball and gate valves as subsea isolations valve (SSIV) of the system. To this end, systems have been equated using the fault tree method and graphs were collected based on failure data rates (λ) obtained in the cited references for different operating situations. During development, important concepts are explored such as reliability and availability, the fault tree method, the Piper-Alpha incident, the submarine isolation systems and the importance of them in the oil and gas industry. In its conclusion, the study demonstrates the highest reliability of systems that use a ball valve as the isolation valve in the systems and the impact in the availability of doing or not testing interventions in the systems.

Keywords: Subsea Isolation System (SSIS); Subsea Isolation Valve (SSIV); Reliability.

1. Introdução

A importância do petróleo e gás para a economia mundial não é nenhuma novidade e não é diferente no cenário nacional. Nos últimos anos, a indústria de petróleo e gás no Brasil cresce consideravelmente. O primeiro salto na produção nacional ocorreu na década de 80 com a descoberta das reservas da Bacia de Campos, e foi na década seguinte que a produção ultrapassou a marca de 1 milhão de barris/dia. Esse crescimento do setor engendrou também importantes mudanças na estrutura industrial brasileira. Afinal, o setor teve grande aumento na participação no valor da transformação industrial, além de reduzir a historicamente alta dependência de importação de petróleo. Portanto, o desenvolvimento da indústria de óleo e gás no país tem impacto direto com o desenvolvimento da economia do mesmo, principalmente em virtude da ampliação dos investimentos na indústria, sobretudo no segmento de exportação e produção (E&P).

O desenvolvimento de novas tecnologias sempre esteve presente na produção de óleo e gás e é fundamental para garantir a segurança de equipamentos, pessoas e garantir a integridade do meio ambiente. Fato que é agravado ao se tratar de produção em águas profundas. Os sistemas submarinos de isolamento (SSIS's) atuam na segurança. Os mesmos possuem a função de isolar a plataforma do sistema submarino em caso de problemas durante a produção, como por exemplo, a liberação não intencional de hidrocarbonetos para a superfície. A implementação destes sistemas se tornou maior após o incidente de *Piper Alpha*, incidente onde ocorreu a explosão de uma importante plataforma de petróleo localizada no Mar do Norte e que é abordado neste trabalho.

Mesmo após estudos provarem que a utilização de SSIS's teriam evitado a catástrofe de *Piper Alpha*, a utilização dos sistemas de isolamento não é obrigatória por norma. Existem diversas configurações e possibilidades de sistemas de isolamento e por isso, realizar o estudo da disponibilidade é de extrema importância, a fim de que o sistema seja o mais adequado com o cenário no qual será implantado. Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre dois sistemas simples que diferem entre si pelo tipo de válvula submarina de isolamento utilizada, sendo uma do tipo esfera e outra do tipo gaveta, mostrando o impacto de cada uma na confiabilidade dos sistemas.

No decorrer do trabalho fica evidente a importância da disponibilidade dos sistemas tanto com relação à segurança, como também no impacto sobre a produção e intervenções necessárias.

2. Revisão Bibliográfica

Os tópicos apresentados na revisão bibliográfica irão abordar os assuntos mais importantes para a compreensão dos estudos de casos que serão abordados neste trabalho.

2.1. Definições

A seguir serão apresentadas definições e informações importantes sobre confiabilidade e disponibilidade, conceitos fundamentais no desenvolvimento deste trabalho.

2.1.1 Confiabilidade

Embora muitas empresas não costumam considerar o estudo da confiabilidade como fundamental nos projetos de seus produtos, processos e/ou serviços, já é sabido a importância do mesmo. Fogliatto (2015) cita 3 motivos que mostram a importância da confiabilidade em projetos que são: I - Itens confiáveis requerem menor intervenção do fabricante após venda, gerando menos custos. II - Projeto de itens confiáveis integra funções de design e manufatura, gerando processos mais robustos e estáveis, e III - Fornece suporte quantitativo a técnicas qualitativas bastante difundidas como FMEA (*failure mode effect analysis*). De acordo com Humphreys (1994), alocar confiabilidade em um produto é custoso e precisa ser negociado com as consequências da não confiabilidade do produto.

Quando o cenário é produção de petróleo e gás, principalmente offshore em grandes profundidades, a relação custo benefício de confiabilidade em projetos de equipamentos se torna

praticamente indiscutível, pois as consequências da falha podem ser muito impactantes, seja do ponto de vista financeiro ou de segurança. Este último é o foco em sistemas submarino de isolamento (SSIS) tratados neste trabalho.

Segundo Fogliatto (2015), "A confiabilidade de um item corresponde à sua probabilidade de desempenhar adequadamente ao seu propósito especificado, por um determinado período de tempo e sob condições ambientais pré-determinadas." Já segundo à NBR ISO 14224, a confiabilidade é definida como a "Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas durante um determinado intervalo de tempo."

Com relação à confiabilidade na fase de projeto, para produtos onde a confiabilidade é de suma importância, como é o caso das SSIV's (válvulas submarinas de isolamento), é fundamental que a engenharia de qualidade faça parte de todas as etapas do projeto a fim de garantir a confiabilidade exigida do produto final.

Quando a confiabilidade a nível de componentes não é atingida, Murthy sugere três formas de elevar a confiabilidade, são elas:

1. **Redundância de componentes:** Replicar componentes a fim de elevar a confiabilidade em um produto é comum no universo submarino. Por exemplo, um sistema de isolamento com duas válvulas de isolamento em série elevará a confiabilidade do sistema em relação à um sistema com uma única válvula. Decisão que deve ser considerada com cautela pois deve-se considerar que o custo do projeto e da manutenção poderá ser elevado.

Figura 1 – Impacto da redundância de componentes na confiabilidade
Fonte: ALVES, 2015

2. **Reposição Preventiva:** Diminuir o intervalo de tempo entre reposições preventivas garante que a confiabilidade não caia a níveis muito baixos. Após cada reposição a confiabilidade é elevada à níveis de um item novo. Porém, na engenharia submarina esta é uma ação que se torna muito custosa devido à dificuldade de acesso e aos elevados custos dos prestadores de serviço e dos prejuízos da parada de produção.

Figura 2 – Impacto da reposição preventiva na confiabilidade
Fonte: ALVES, 2015

3. **Desenvolvimento:** Aumenta-se a confiabilidade de componentes através de um programa de teste-análise-e-correção (TAAF, *Test-Analyze-And-Fix*), ou seja, melhoria do

componente em si. Embora isso aumente o valor dos produtos, é prática comum quando se trata de equipamentos submarinos, principalmente equipamentos com função de segurança como válvulas em sistemas de isolamento.

Figura 3 – Impacto do desenvolvimento na confiabilidade
Fonte: ALVES, 2015

2.1.2 Disponibilidade

A disponibilidade de um item pode ser definida como a probabilidade do mesmo estar disponível para operar quando for exigido. A mesma depende da confiabilidade e da estratégia de manutenção. Definir a disponibilidade de um item vai depender de como o mesmo é classificado com relação ao seu reparo em caso de falha.

Itens não-reparáveis: São aqueles que ao sofrerem uma falha, continuarão no estado falho até o final do tempo de interesse da análise, ou seja, tempo de missão. Este modelo também pode ser adotado quando não é possível identificar a ocorrência da falha durante a operação. Em ambos os casos, a função disponibilidade ($A(t)$) é igual à função confiabilidade ($R(t)$).

$$A(t) = R(t) \quad (1)$$

$$A(t) = e^{-\lambda t} \quad (2)$$

onde λ é a taxa de falhas em falhas/ano e t é o tempo de operação.

Itens reparáveis: São componentes que operam continuamente ou são amplamente monitorados, de forma que imediatamente após a falha, esta é detectada e o processo de reparo se inicia.

Figura 4 – Comportamento itens reparáveis
Fonte: ALVES, 2015

Neste caso, a função disponibilidade leva em consideração a taxa de reparo (μ) e a taxa de falha (λ). Quando as variáveis aleatórias “tempo para a falha” e “tempo para reparo” seguem uma distribuição exponencial, a função disponibilidade fica:

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (3)$$

Itens testados periodicamente: Este tipo de item são tipicamente sistemas de segurança, como por exemplo válvulas submarinas de isolamento (SSIV), projetados para situações de emergência que portanto operam eventualmente ou não são monitorados continuamente. Necessitam de testes periódicos para reduzir a probabilidade de uma falha ser revelada justamente numa demanda de emergência real. O estado do item só pode ser conhecido através de demanda em teste ou inspeção periódica.

Considerando itens com taxas de falha constante (exponencial), a disponibilidade é dada por:

$$A(t) = R(t - \tau[t/\tau]) \quad (4)$$

$$A(t) = e^{-\lambda(t - \tau[t/\tau])} \quad (5)$$

onde $[t/\tau]$ é a parte inteira de t/τ , e τ é o período entre testes.

2.2. Piper Alpha e as mudanças na segurança da indústria de óleo e gás

A seguir será apresentado um breve histórico sobre o incidente de Piper Alpha, impacto do mesmo sobre a rigorosidade das exigências de segurança e a relação com os Sistemas Submarinos de Isolamento.

2.2.1. O incidente

Piper Alpha foi uma plataforma de produção de petróleo que ficava localizada no Mar do Norte aproximadamente a 193 km da costa da Escócia. A mesma era operada pela Occidental Petroleum Ltd. e Texaco, proprietária de 22% das ações. A plataforma era conectada ao terminal Flotta em Orkney, arquipélago localizado no Mar do Norte, por um oleoduto e um gasoduto. Além da sua produção, a Piper Alpha enviava também para Orkney gás de outras plataformas que ficavam mais afastadas da costa que recebia através de duas tubulações.

Em 06 de julho de 1988 houve uma explosão causada por um vazamento de condensado de gás natural que havia se formado sobre a plataforma. A explosão iniciou incêndios secundários no óleo, derretendo a tubulação de chegada de gás. O fornecimento de gás causou uma segunda grande explosão que engolfou toda a plataforma. O acidente causou a morte de 167 pessoas, a grande maioria morreu sufocada dentro dos alojamentos.

2.2.2. O relatório de Cullen

Em novembro de 1988 foi montado um grupo, liderado por Lord Cullen, para realizar a investigação do acontecimento. Somente em novembro de 1990 foi concluído que o vazamento inicial de condensado era resultante de trabalho de manutenção sendo realizado simultaneamente numa bomba e sua válvula de segurança e portanto a Occidental Petroleum foi declarada culpada devido ao fato de ter procedimentos de manutenção inapropriados. Em uma segunda fase da investigação um relatório elaborado por Cullen com recomendações de segurança mais profundas foi aceito pela indústria.

2.2.3. Erros e lições

A investigação realizada apontou vários eventos que contribuíram para o incidente. Na verdade foi uma sequência de erros que contribuíram para a magnitude do desastre. Dentre eles, os principais foram:

- Sistema de ordem de serviço arcaico e não seguido à risca;
- Sistema dilúvio anti-incêndio não funcionou;
- As rotas de fuga não eram perfeitamente conhecidas;
- Ao contrário do que pensavam as pessoas, os alojamentos não eram à prova de fumaça e chamas;
- Treinamentos de emergência não eram realizados regularmente;
- Paredes corta-fogo mal dimensionadas; e
- Auditorias de segurança mal executadas.

Após o acidente, aproximadamente um bilhão de libras foi investida pela indústria antes mesmo do relatório oficial de Cullen ser emitido em itens de segurança, dentre eles:

- Melhoria nos sistemas de gestão de ordens de serviço;
- Relocação de algumas válvulas de desligamento de emergência de oleodutos e gasodutos;
- Instalação de sistemas de isolamento de oleodutos e gasodutos submarinos;
- Mitigação de riscos de fumaça;
- Melhorias nos sistemas de evacuação e escape; e
- Início de análises formais de segurança;

2.2.4. SSIS e o incidente

Voltando a falar um pouco sobre a investigação do incidente, estimou-se que dentre os principais fatores que agravaram o incidente, o fato de a plataforma de Piper Alpha continuar a receber gás de Tartan, umas das plataformas mais afastadas que enviava gás para a Piper Alpha, foi um dos principais agravantes. Isso ocorreu pois os operadores de Tartan não tinham autoridade para parar a produção, mesmo vendo que Piper Alpha estava em chamas e então continuou comprimindo gás e alimentando o fogo. A tubulação que ligava Tartan à Piper não possuía sistemas de isolamento. Caso tivesse, mesmo sem autoridade dos operadores de Tartan, a tubulação teria sido isolada. Não se pode afirmar que isso evitaria a catástrofe, mas não teria agravado o problema.

Portanto, como visto anteriormente, a instalação de sistemas de isolamento como item de segurança passou a ser considerado como relevante.

2.3. Banco de dados de confiabilidade de SSIS's

Em 1993, um estudo foi realizado a fim de prover novos dados de confiabilidade e analisar configurações de SSIS's para as operadoras. O mesmo foi patrocinado igualmente por duas organizações, a UKOOA e a divisão de segurança *offshore* da HSE (*Health and Safety Executive*). Inicialmente o estudo contou com 7 operadoras, resultando em um total de 50 SSIS's. Para atingir o objetivo principal, o estudo teve como tarefas principais;

- Obter dados de falhas em SSIS's existentes;
- Prover uma base de dados para os dados de confiabilidade coletados;
- Analisar os dados de confiabilidade a combinar os mesmo com dados existentes;
- Utilizar os resultados para analisar configurações de SSIS's;
- Definir as configurações mais confiáveis de SSIS's.

De acordo com que novos SSIS fossem sendo instalados, os mesmos iam sendo incluídos no estudo. Além destes, sistemas de operadoras que inicialmente não forneciam dados passaram a participar. Os novos sistemas possuíam dados de operação limitados e mesmo sistemas mais antigos que foram posteriormente adicionados, muitas vezes não tinham dados de qualidade ou sequer os tinham. Portanto o estudo precisou combinar dados genéricos com dados coletados para poder fornecer informações com maior qualidade para armazenar no banco de dados.

Resumindo, embora com muitas limitações, o estudo foi fundamental para o desenvolvimento de um banco de dados que trouxe muitos benefícios não só com relação à confiabilidade de SSIS's como também informações para desenvolvimento dos projetos de SSIV's.

2.4. Sistemas Submarinos de Isolamento

Os SSIS's são sistemas compostos por um conjunto de equipamentos que juntos possuem um propósito de segurança. A função de um SSIS é isolar a plataforma do conjunto submarino em caso de emergência a fim de proteger equipamentos e principalmente as pessoas, como por exemplo em caso de liberação não intencional de hidrocarbonetos para a superfície. O principal componente de um SSIS é a válvula de isolamento (SSIV - Subsea Isolation Valve). A mesma normalmente é uma válvula esfera, de retenção ou gaveta. Segundo Humphreys (1994), as válvulas do tipo gaveta são mais utilizadas em árvores de natal e manifolds submarinos, e são usadas como uma SSIV em alguns dutos de poços satélites onde há altas pressões.

Figura 5 – SSIV Gaveta

Fonte: <http://www.offshore-technology.com/uploads/feature/feature96758/3-bel_hsr_gate-valve.jpg>

Figura 6 – SSV Esfera

Fonte: <http://www.offshore-technology.com/uploads/feature/feature96758/2-bel_ballvalve.jpg>

2.5. Componentes dos SSIS's

A seguir estão listados os componentes utilizados nos sistemas de isolamentos que serão considerados neste trabalho.

- **Válvula Esfera:** A válvula do tipo esfera é a mais comumente utilizada como uma válvula submarina de isolamento pois proporcionam boa vedação. A vedação normalmente é do tipo metal-metal na interface sede-esfera pois mesmo tendo vedações mais eficientes, este apresenta uma vida útil muito maior. Os tamanhos mais comuns vão de 3" a 36" (76,2 a 914,4 mm) e podem ser toda soldada, *top-entry* ou *split-body*. As duas primeiras são as mais comuns, a primeira possui trechos de tubulação soldadas ao corpo da válvula e portanto, em caso de manutenção deverá ser cortada da tubulação, já a segunda possui flanges para fixar à tubulação o que torna a mesma mais pesada.
- **Válvula Gaveta:** Este tipo de válvula não costuma ser usado como válvula submarina de isolamento porém, durante o levantamento de dados do HSE ainda haviam algumas instaladas. Os sistemas (SSIS) mais recentes costuma utilizar a válvula esfera pois, como dito anteriormente, no caso das válvulas do tipo gaveta, quanto maior o diâmetro da tubulação, maior a dimensão da mesma, o que a torna cada vez mais inviável. As válvulas gavetas devem ser consideradas para aplicações em dutos com menores diâmetros e altas pressões.

- **HPU (Hydraulic Power Unit):** É a fonte de potência hidráulica. Responsável por fornecer todo o fluido hidráulico para o sistema submarino. Basicamente é composto por:
 - Reservatório de fluido hidráulico;
 - Sistema de bombeamento;
 - Acumulador;
 - Regulador de pressão, e outros.

Figura 7 – HPU

Fonte: <http://www.oceaneering.com/wp-content/uploads/2012/01/HydraulicPowerUnit.jpg>

- **Painel de Controle:** O mesmo é responsável por controlar o acionamento da SSIV. Basicamente é composto por uma válvula solenoide e uma válvula piloto. A válvula solenoide é acionada por um sinal elétrico acionando pneumaticamente a válvula piloto que enviará ou não fluido hidráulico da HPU para o atuador.
- **Atuador com retorno por mola:** Atuador do tipo falha segura (*Fail Safe Close*) responsável pelo acionamento da SSIV. O mesmo permanece pressurizado em condições normais de operação submarina a fim de permitir passagem do fluido de produção. Em caso de necessidade de isolamento do sistema submarino, o atuador é despressurizado e então a válvula é fechada pela atuação da mola.

2.6. Árvore de Falhas

Os tópicos a seguir irão tratar sobre o método “Árvore de Falhas”, o qual será utilizado no desenvolvimento deste trabalho para modelar os sistemas de isolamentos, auxiliando no cálculo de confiabilidade dos mesmos.

2.6.1. O método

A árvore de falhas, também conhecida como FTA - *Fault Tree Analysis*, é uma técnica dedutiva, estruturada, que representa graficamente a associação de portões lógicos para identificar possíveis combinações de eventos que levam a um evento principal, denominado evento topo, permitindo quantificar sua probabilidade de ocorrência. Técnica muito utilizada para modelagem de sistemas.

O método foi desenvolvido por volta de 1960 por W.A.Watson, da *Bell Laboratories* e aperfeiçoada pela *Boeing Corporation*. O mesmo visa melhorar a confiabilidade de produtos e processos e dentre outros, traz benefícios como o aumento do domínio das características técnicas dos equipamentos que compõem o sistema, a identificação da combinação das falhas críticas e a melhor interação entre os integrantes das equipes de projeto, operação e manutenção (intervenção).

As principais características do método são:

- Aplicável tanto para projeto quanto para sistemas em operação;
- Pode ser utilizada para análise qualitativa (determinar falhas básicas) e quantitativa;

- Pode ser desenvolvida em diferentes níveis de complexidade;
- Fácil interpretação para leigos no assunto analisado; e
- Ferramenta de fácil aprendizado;

2.6.2. Simbologia e equacionamento

A principal premissa do método é a de que todos os eventos são independentes entre si, ou seja, a ocorrência ou não de um evento não altera a probabilidade da ocorrência de outro evento.

A Figura abaixo representa uma árvore de falhas simples e que contém os principais portões lógicos possíveis no método.

Figura 8 – Árvore de falhas (simbologia)
Fonte: O Autor, 2016

Os elementos são:

Evento Básico: São os dados de entrada e representam a probabilidade de ocorrência do evento indesejável. Os dados de entrada sempre são probabilidade de insucesso, por exemplo a não-confiabilidade, indisponibilidade ou outros. Este portão é representado por um círculo abaixo da caixa de descrição do evento.

Portão E: Representa uma característica de redundância entre os eventos abaixo do mesmo, ou seja, para que o evento descrito no portão ocorra, todos os eventos contidos no mesmo devem ocorrer. Este portão é calculado da seguinte forma:

$$Q_E(t) = q_1(t) * q_2(t) * ... * q_n(t) \quad (6)$$

$$Q_E(t) = \prod_{i=1}^n q_i(t) \quad (7)$$

onde, $Q(t)$ representa probabilidade de insucesso do portão, $q(t)$ a probabilidade de insucesso do evento abaixo do portão.

Portão OU: Representa uma característica de dependência entre os eventos pertencentes ao mesmo, ou seja, se pelo menos um dos eventos abaixo do portão ocorrer já é o suficiente para que o evento do portão ocorra.

$$Q_{OU}(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i(t)) \quad (8)$$

3. Estudos de Caso

Nos tópicos a seguir, serão apresentados os sistemas submarinos de isolamento que serão analisados, as premissas consideradas para análise dos mesmos e o desenvolvimento do estudo da confiabilidade dos sistemas.

3.1. Sistemas Submarinos de Isolamento (SSIS)

Serão considerados dois sistemas de isolamento onde a única diferença entre os mesmos é a válvula submarina de isolamento (SSIV). Em um sistema será considerada a válvula como sendo uma válvula esfera e no outro uma válvula gaveta. O objetivo de esta ser a única diferença é justamente analisar o impacto do tipo de válvula na confiabilidade do sistema. São eles:

Figura 9 – Sistema submarino de isolamento com válvula (SSIV) esfera

Fonte: O Autor, 2016

Figura 10 – Sistema submarino de isolamento com válvula (SSIV) gaveta
Fonte: O Autor, 2016

3.2. Modos de Falhas dos SSIS's

O evento topo a ser analisado é a falha em isolar o fluxo do processo de produção, ou seja, falha do sistema de isolamento em cumprir sua função. Para isso, serão abordados dois modos de falhas, que seguem:

1. Falha em isolar o fluxo a jusante da SSIV;
2. Falha da SSIV em isolar o fluído de produção do meio externo (vazamento para o meio ambiente).

3.3. Modos e Taxas de Falhas dos Componentes

A tabela abaixo apresenta todos os modos de falhas dos componentes de ambos sistemas apresentados anteriormente que serão utilizados para determinar a confiabilidade dos sistemas para os modos de falhas definidos.

Tabela 1 – Taxas de falhas dos componentes dos SSIS's

Componente	Modo de Falha	Taxa de Falha (falhas/ano)	Modelo de Reparo
<i>Subsea</i>			
Válvula Gaveta	Falha em fechar	1,30E-02	Testado Periodicamente
	Vazamento Externo	2,00E-02	Testado Periodicamente
	Vazamento Interno	2,10E-03	*Não Reparável
Válvula Esfera	Falha em fechar	2,88E-03	Testado Periodicamente
	Vazamento Externo	5,26E-03	Testado Periodicamente
	Vazamento Interno	1,55E-03	*Não Reparável
Atuador	Falha em fechar	2,46E-03	Testado Periodicamente
Umbilical + jumper	Bloqueado	3,07E-03	Testado Periodicamente
Circuito de retorno da HPU	Bloqueado	4,03E-03	Testado Periodicamente
<i>Topside</i>			
Válvula Piloto	Falha em atuar	1,26E-02	Testado Periodicamente
Válvula Solenóide	Falha em atuar	1,27E-02	Testado Periodicamente
ESD	Falha lógica	7,01E-03	Testado Periodicamente

Fonte: HUMPHREYS, 1996¹

Tanto para válvula SSIV do tipo gaveta quanto do tipo esfera, o modo de falha “Vazamento Interno”, ou seja, vazamento do líquido de produção através da válvula fechada será tratado como não-reparável pois, como será especificado nas premissas, não será considerado teste de estanqueidade.

3.4. Árvores de Falhas

Figura 11 – Árvore de falhas dos SSIS's definidos

Fonte: O Autor, 2016

¹ Os dados da tabela que não constam na fonte foram fornecidos pelo orientador pois não estão disponíveis de forma gratuita ou para público em geral.

Para definir a confiabilidade do sistema, deve-se calcular o “Evento Topo”, definido na árvore como o resultado do portão “OU1”. Para isso, tem-se que:

$$Q_{OU1} = Q_{OU2} * q_{EB9} \quad (9)$$

$$Q_{OU2} = 1 - [(1 - Q_{OU3}) * (1 - q_{EB1}) * (1 - Q_{OU4}) * (1 - q_{EB2}) * (1 - Q_{OU5})] \quad (10)$$

$$Q_{OU3} = q_{EB3} * q_{EB4} \quad (11)$$

$$Q_{OU4} = q_{EB5} * q_{EB6} \quad (12)$$

$$Q_{OU5} = q_{EB7} * q_{EB8} \quad (13)$$

E os eventos básicos são definidos por:

$$q_{EB}(t) = 1 - A(t) \quad (14)$$

Portanto, para os eventos básicos testados periodicamente, EB 1,3,4,5,6,7,8 e 9, tem-se,

$$q_{EB(\text{testados periodicamente})}(t) = 1 - e^{-\lambda(t-\tau[t/\tau])} \quad (15)$$

E para o evento básico não reparável, EB 2,

$$q_{EB2}(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (16)$$

3.5. Premissas e Limitações

As seguintes limitações e premissas foram consideradas para o desenvolvimento deste estudo:

- Todas as falhas consideradas neste trabalho estão ligadas somente aos componentes. Foram desconsiderados quaisquer erros humanos ou provenientes de fontes externas.
- Todos os componentes são considerados “novos” após quaisquer atividade de teste ou reparo.
- Os modos de falha a serem analisados a fim de determinar a confiabilidade do sistema de isolamento em isolar o fluxo do processo de produção são: Falha em isolar o fluxo a jusante da SSIV e Falha da SSIV em isolar o fluido de produção para o meio ambiente.
- Para o modo de falha “isolar o fluxo a jusante da SSIV”, todos os componentes serão tratados como itens testados periodicamente.
- Para o modo de falha “vazamento através da válvula fechada” (vazamento interno), a SSIV será tratada como um item não reparável pois será desconsiderado o teste de estanqueidade.
- Embora seja comum os sistemas submarinos de isolamento possuírem *jumper* (trecho de umbilical), a taxa do mesmo será desconsiderada pois o comprimento do mesmo em relação ao umbilical é muito pequeno.

3.6 Resultados

Modelando os sistemas baseado na árvores de falhas e nas equações de probabilidade de falhas para um tempo de operação dos sistemas de 10 anos utilizando o excel, foram levantados alguns resultados.

Para o “evento topo” da árvore de falhas, o modo de falha “falha em isolar o fluxo do processo”, o qual caracteriza a falha do sistema submarino foram levantados os gráficos a seguir para os sistemas com SSIV do tipo esfera e gaveta para tempo de operação de 10 anos ($t = 10$) e período entre testes de seis meses ($\tau = 0,5$), um ano ($\tau = 1$) e dois anos ($\tau = 2$). Sabendo que Q_{OU1} é a combinação de Q_{OU2} e q_{EB9} temos os seguintes gráficos.

Figura 12 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV esfera para $\tau = 0,5$
 Fonte: O Autor, 2016

Figura 13 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV gaveta para $\tau = 0,5$
 Fonte: O Autor, 2016

Figura 14 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV esfera para $\tau = 1$
 Fonte: O Autor, 2016

Figura 15 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV gaveta para $\tau = 1$
 Fonte: O Autor, 2016

Figura 16 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV esfera para $\tau = 2$
 Fonte: O Autor, 2016

Figura 17 – Probabilidade de falha em isolar fluxo do processo com SSIV gaveta para $\tau = 2$
 Fonte: O Autor, 2016

Colocando em um mesmo gráfico, a fim de comparação, a curva Q_{OU1} para sistema com válvula gaveta e com válvula esfera para tempo de operação de 1 ano ($t = 1$) e período entre testes de 1 ano ($\tau = 1$) tem-se,

Figura 18 – Comparação entre probabilidade de falha em isolar fluxo do processo de sistemas com válvula de isolamento esfera e gaveta para $t = \tau = 1$
 Fonte: O Autor, 2016

Colocando o gráfico anterior com a probabilidade de falha em escala logarítmica temos,

Figura 19 – Comparação entre probabilidade de falha em isolar fluxo do processo de sistemas com válvula de isolamento esfera e gaveta para $t = \tau = 1$
 Fonte: O Autor, 2016

A probabilidade de falha do sistema com válvula de isolamento do tipo esfera é consideravelmente menor do que com válvula gaveta, ou seja, o sistema é mais confiável. Porém esta diferença é acentuada com o aumento do tempo de operação devido ao modo de falha “vazamento interno” na válvula de isolamento pois como visto anteriormente, para este modo de falha, como o item não é reparável, a probabilidade de falha é crescente de acordo com os dados de taxa de falhas, que são maiores para a válvula gaveta, fazendo com que a probabilidade máxima de falha se torne cada vez maior com o tempo de operação, mesmo o item retornando ao estado “novo” após cada intervenção.

4. Conclusão

Este trabalho cumpriu com o seu objetivo de apresentar um estudo de confiabilidade de sistemas submarinos de isolamento e também de mostrar a importância destes sistemas no cenário da indústria de óleo e gás. O mesmo também apresentou um pouco sobre a origem dos SSIS's, os componentes dos sistemas e ainda abrangeu um método que pode ser utilizado para quantificar a confiabilidade dos sistemas (árvore de falhas).

Baseado no que foi apresentado, podemos concluir que o sistema com válvula submarina de isolamento do tipo esfera se mostrou mais confiável do que o sistema com SSIV do tipo gaveta. Porém, vale lembrar que o modo de falha “vazamento interno” acentuou essa diferença devido à premissa de não-reparável. Portanto, a prática de intervenções (testes) a fim de verificar a disponibilidade do sistema é fundamental para garantir a confiabilidade do mesmo em um nível esperado se tratando de um sistema projetado para a segurança de equipamentos e pessoas. Porém, há situações onde a realização de teste com certa frequência é difícil e custosa, tendo as vezes um período entre testes longo. Nestes casos, considerar os resultados obtidos para componentes não reparáveis é ainda mais importante. Para sistemas instalados em locais onde o período entre testes se torna cada vez maior, a utilização do sistema com válvula esfera se mostra muito mais atraente do ponto de vista da confiabilidade.

Referências

ALVES, A.L.R. **Confiabilidade e Análise de Risco Aplicada**. Porto Alegre: PROMINP, Engenheiro Projetista para Válvulas de Aplicação Submarina, 2015. 158 slides.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14224. 2011: Indústrias de petróleo e gás natural** - Coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamentos, 225 páginas.

EUTHYMIU, E.J. *One Company's Experience in Subsea Valve Testing*. Trabalho apresentado no Offshore Technology Conference, Houston, Texas U.S.A, 6-9 Maio 2002.

FOGLIATTO, F.S. **Fundamentos de Confiabilidade e Análise de Risco**. Porto Alegre: PROMINP, Engenheiro Projetista para Válvulas de Aplicação Submarina, 2015. 193 slides.

HUMPHREYS, M. *Extension of the Subsea Isolation Systems Reliability Database*. Abingdon: HSE BOOKS, 1996.

HUMPHREYS, M. *Reliability Study Into Subsea Isolation Systems*. Abingdon: HSE BOOKS, 1994.

MASHIBA, M.H.S. **Válvulas e Atuadores Submarinos**. Porto Alegre: PROMINP, Engenheiro Projetista de Válvulas para Aplicação Submarina, 2015. 325 slides.

MURTHY, D.N.P et al. *Component Reliability Specification*. Reliability Engineering and System Safety, 28 fev. 2009, p. 1609, 1617.

ROSSETTO, D. **Análise Estrutural de Válvulas**. Porto Alegre: PROMINP, Engenheiro Projetista de Válvulas para Aplicação Submarina, 2015. 279 slides.