

## **Aplicação de Análise de Modo de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA) para Priorizar os Equipamentos e Componentes do Sistema Submarino de Árvore de Natal**

Fernanda Marques de Moura e Marcelo Ramos Martins

Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Riscos - LabRisco, Departamento de Arquitetura Naval e Engenharia Oceânica, Universidade de São Paulo – USP

Adriana Miralles Schleder

Universidade Estadual Paulista - UNESP – Itapeva / Laboratório de Análise, Avaliação e Gerenciamento de Risco - LabRisco, Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo (USP)

Leonardo Oliveira de Barros e Rene Thiago Capelari Orlowski

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – CENPES - Petrobras

### **RESUMO**

Instalações offshore gastam milhões anualmente tentando garantir a integridade de seus equipamentos. O desafio está em determinar onde aplicar os recursos sempre finitos e limitados do setor para fornecer o maior benefício. A inspeção baseada em risco (RBI) foi desenvolvida na indústria do petróleo para auxiliar na identificação do equipamento de maior risco (trabalhando com os respectivos modos de falha) e para projetar um programa de inspeção que não apenas identifica os modos de falha mais relevantes, mas também reduz suas chances de ocorrência. Este estudo faz parte de um projeto que tem por objetivo desenvolver uma metodologia de monitoramento da integridade dos equipamentos, otimizando as políticas de fiscalização, com base no risco associado à operação de Árvores de Natal em operações submarinas. Os resultados desta fase do projeto incluem o estudo de duas configurações típicas de Árvores de Natal e a avaliação de seus FMECAs; que se basearam na base de dados OREDA [12,13], em informações disponíveis na literatura e em informações de fornecedores de equipamentos. Por fim, é fornecida uma classificação dos componentes das árvores de Natal com base em seus índices de risco. Esses resultados contribuem para a realização de análises de risco mais eficazes na indústria offshore, uma vez que os dados sobre esses equipamentos são escassos na literatura, principalmente dados relacionados às suas configurações, probabilidades de falha, métodos de inspeção e probabilidades de detecção de falha.

*Palavras-chave: Árvore de Natal, FMECA, RBI, Criticidade, Modos de falha, Submarino, Offshore*

### **1. INTRODUÇÃO**

As operações realizadas nas plataformas offshore de petróleo são cercadas por circunstâncias delicadas que envolvem a segurança das pessoas, a preservação do meio ambiente e o sucesso econômico de organizações nacionais e multinacionais. Portanto, é fundamental otimizar os custos do processo e minimizar os riscos envolvidos.

Entre outros perigos, neste setor, existem sistemas altamente complexos e o envolvimento de substâncias perigosas, portanto, qualquer tipo de vazamento pode causar altos níveis de impacto na vida marinha e humana. Fortuitamente, por diferentes causas, podem ocorrer acidentes catastróficos, com efeitos como explosões e derramamentos de óleo. Acidentes dessa magnitude comumente ocorrem devido a uma série de eventos precursores não controlados, que progridem para eventos maiores [1].

1 MS, Engenharia Naval e Oceânica – LabRisco

2 PhD, Engenharia Naval e Oceânica – LabRisco

3 DRA, Engenharia Naval e Oceânica – LabRisco

Possíveis falhas de projeto ou equipamentos são comumente de análise complexa, por se tratar de casos heterogêneos, não existindo um software ou modelo de cálculo perfeito que expresse plenamente a realidade de possíveis situações de falha. Porém, existe a possibilidade de encontrar valores que representem uma boa aproximação com a realidade. Portanto, projetos frágeis ou tomadas de decisão incorretas podem levar a uma grande chance de um acidente [2].

Considerando todos os riscos que a indústria offshore pode trazer, várias abordagens têm sido empregadas para gerenciar a segurança offshore, que consideram, principalmente, fatores organizacionais e humanos, cultura de segurança e abordagem baseada em risco. Em particular, este último classifica o equipamento ou processo em termos de pontuação de risco. Para determinar os intervalos de inspeção e mitigação de risco, a classificação avaliada a partir da probabilidade de falha e suas consequências é utilizada para a tomada de decisão [3].

Uma das primeiras etapas da inspeção baseada em risco é identificar o risco, para isso, uma das abordagens mais utilizadas é a utilização do FMECA (*Failure Mode and Effect, and Criticality Analysis*). Assim, é possível classificar os modos de falha de acordo com o risco e, consequentemente, priorizar a inspeção dos componentes ou equipamentos mais críticos. Este artigo apresenta a avaliação FMECA de dois modelos de Árvore de Natal Submarina.

## 2. ÁRVORE DE NATAL SUBMARINA (ANM)

Um Sistema de Produção Submarino (SPS) típico adota o sistema submarino de Árvore de Natal (ANM) como uma parte vital, pois as ANMs são usadas para controlar o fluxo de hidrocarbonetos, injetar gás e água e manter a pressão do reservatório [4]. Os componentes das ANMs, como válvulas, dutos e outros, operam continuamente e são suscetíveis a falhas de desgaste e corrosão [5].

A ANM é utilizada na fase de produção do poço, alocada na cabeça do poço, e é composta por sistemas de válvulas e acessórios que garantem o controle da operação [6]. É um conjunto composto por válvulas operadas remotamente ou hidráulicamente, com a função de controlar a vazão dos fluidos produzidos ou injetados no poço. Este sistema de equipamentos possui diversas funções, sendo as principais: permitir operações de intervenção no poço; controlar a produção de hidrocarbonetos; atuar como barreira entre o reservatório e o ambiente externo; atuar como uma barreira entre os fluidos produzidos e os fluidos injetados; permitir acesso à válvula de controle de subsuperfície; permitir a transmissão de sinais elétricos para equipamentos de fundo de poço; facilitar a injeção de produtos químicos no poço ou linha de fluxo; promover o acesso para operações de *workover*; permitir fluidos diretos produzidos para a linha de fluxo; monitorar parâmetros como: pressão, temperatura, detecção de areia, entre outros [6].

As Árvores de Natal que são utilizadas na produção offshore de águas profundas e ultra profundas, podem ser classificadas de acordo com o serviço, podendo ser de produção - que visa regular o fluido produzido, ou de injeção - que tem por objetivo regular o fluxo de água ou gás injetor [7]. Além disso, eles também podem ser classificados de acordo com a disposição de suas válvulas e a configuração dos sistemas de controle. De acordo com a posição desses dispositivos, as Árvores de Natal são divididas em horizontais e verticais (também conhecidas como convencionais) [4]. Essas classificações estão diretamente ligadas às válvulas principais de uma ANM.

As válvulas podem ser operadas por sinais eletro-hidráulicos, manualmente por mergulhador ou por ROV (*Remote Operated Vehicle*), dependendo da profundidade da ANM. Também há equipamentos que permitem monitorar parâmetros de produção, como pressão e temperatura. Além disso, as ANMs podem ter elementos como um módulo de controle submarino, conhecido como SCM (*Subsea Control Module*), e uma válvula de estrangulamento [8].

### 2.1 ANM Vertical

A Árvore de Natal Vertical é o modelo mais conhecido e aplicado em todo o mundo. O nome desta configuração justifica-se pela disposição das válvulas principais que ficam no eixo vertical do equipamento. As válvulas são válvulas *swab* de produção; válvula *swab* anular; válvula anular mestre; válvula de injeção de produtos químicos; válvula *crossover*; válvula *wing* de produção; válvula mestre de produção. A posição dessas válvulas tem impacto direto na realização de intervenções no poço. A *swab* de produção e as válvulas

mestras estão localizadas no eixo vertical da linha de produção da ANM Submarina, por isso, as operações que envolvem a retirada da coluna acabam sendo comprometidas.

Este modelo de ANM teve seu desenvolvimento seguindo, de forma cronológica, cinco tipos, de acordo com o método de instalação em fundos marinhos e o sistema de conexão com as linhas de fluxo [9]:

1 - *Diver Operated* (DO): ANM operada por mergulhador em águas de até 200 metros, que controlam as válvulas manuais e fazem conexões de fluxo e linhas de controle. Devido aos altos custos deste modelo, é incomum sua instalação em novos poços.

2 - *Diver Assisted* (DA): instalada por meio de cabo guia e auxílio de mergulhador, em profundidade de até 300 metros, para conectar as linhas de fluxo e controle; como desvantagem, há a necessidade de o mergulhador desconectar as linhas de fluxo e o cabo umbilical, em caso de retirada da árvore para reparos ou intervenções no poço.

3 - *Diverless* (DL): a árvore DL é como a DA, mas para uma profundidade de até 400 metros, suas conexões e operações são realizadas por equipamentos hidráulicos. Devido aos problemas apresentados, este modelo foi substituído por árvores do tipo DA quando instalado em águas com menos de 300 metros de profundidade.

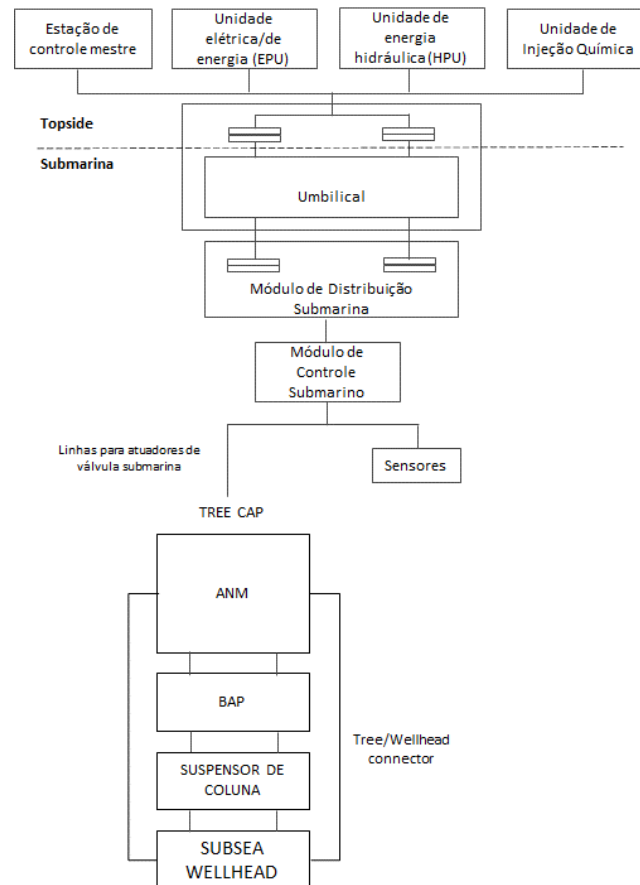
4 - *Diverless lay-away* (DLL): a DLL apresentou inovações incrementais que permitem a instalação no solo marinho junto com as linhas umbilicais e de fluxo, assim, a árvore desce já conectada às linhas. A sua instalação é efetuada sem mergulhador, a uma profundidade de até 500 metros, por meio de um barco lançador de linha, de onde vem o nome *lay-away*. Este modelo também possui conexões para receber intervenções de ROV e tem a vantagem de poder ser retirado em caso de reparos nas linhas, sendo a religação realizada automaticamente no retorno da ANM.

5 - *Diverless Guilineless* (GLL): instalado sem mergulhador e sem cabos guia, este modelo tornou-se a Árvore de Natal padrão para profundidades superiores a 500 metros. É instalado nos poços por meio de plataforma de posicionamento dinâmico (DP), com as conexões acionadas por grandes funis, ou conectores *funnel-up* e *funnel-down*. Os primeiros modelos utilizaram o sistema de conexão *lay-away*, evoluindo para a conexão vertical, e no modelo recente, para o Módulo de Conexão Vertical (MCV). A grande vantagem do MCV é que melhora a produtividade das linhas de lançamento da embarcação de apoio, além de facilitar a logística operacional da sonda e da embarcação lançadora, pois desvincula as operações de instalação da ANM e lançamento de linhas.

## 2.2 Modelos de Referência Árvore de Natal

Neste estudo, dois modelos de referência foram considerados: Árvore de Natal definida para grandes profundidades (cerca de 1.400m) - aqui referida como Árvore de Natal Submarina Pré-sal e Árvore de Natal definida para águas rasas (cerca de 600m) - aqui referida como sem condutor - *Layaway-Guide Line* (DLL-GL). A FMECA foi realizada no nível do sistema, equipamento e componentes do equipamento. Nesta seção, são descritos os equipamentos do modelo usados na análise.

O Sistema Árvore de Natal Submarina Pré-Sal consiste, além da própria ANM Submarina, de um conjunto de equipamentos, como a *Tree Cap* (Capa da Árvore), as Linhas Hidráulicas, a Base Adaptadora de Produção (BAP), o *Tubing Hanger* (Suspensor de Coluna), Módulo de Conexão Vertical (MCV) e o Sistema de Controle. A Fig. 1 mostra os principais componentes do Sistema Submarino de Árvore de Natal de 1.400m.



**Fig. 1** - Modelo Pré-Sal Submarino - Sistema ANM definido para grandes profundidades.

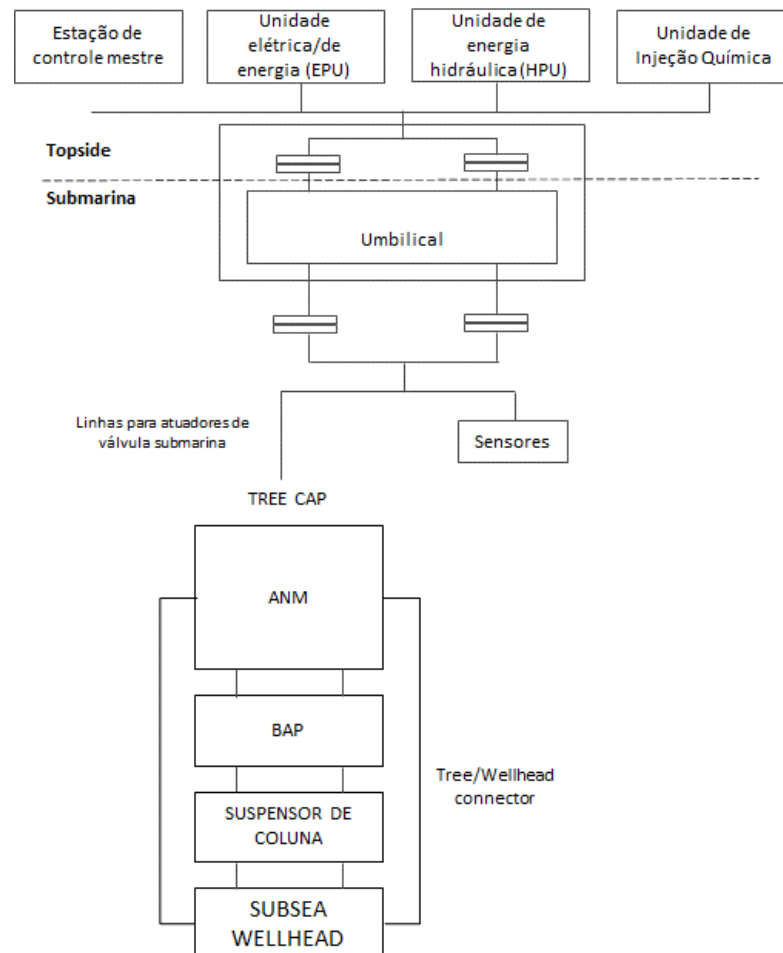
A seguir está uma breve descrição de cada um dos componentes principais:

- **Tree Cap:** uma capa que é colocada no topo do corpo do ANM, com a função principal de vedação entre a parte superior deste e o ambiente externo.
- **Linhas Hidráulicas:** as linhas hidráulicas têm a função de garantir a contenção do fluido hidráulico de acordo com uma vazão e pressão específicas.
- **BAP:** é um conjunto instalado no sistema de cabeça do poço. A BAP fornece acomodação para a instalação do *Tubing Hanger*, colocação e vedação da ferramenta de teste *Blowout Preventor* (BOP). Este componente também possui três cubos para receber o MCV com linhas de fluxo de produção, linha do anel e feixe hidráulico permitindo a instalação da ANM antes do lançamento do MCV.
- **Suspensor de Coluna:** sua função é fazer a interface entre a coluna de produção e a ANM Submarina. É um equipamento utilizado para suportar o peso do pilar e é descarregado no perfil interno da BAP, promovendo a vedação do poço anular com este perfil.
- **MCV:** Existem três tipos de conexões que o MCV faz: entre a ANM e a linha de produção flexível, entre a ANM e a linha anular flexível e entre a ANM e o umbilical eletro-hidráulico (EHU).
- **Sistema de Controle:** a função principal do sistema de controle é fornecer dados de pressão e temperatura do processo, para este modelo de ANM Submarina o conjunto é composto pelo umbilical, Módulo de Distribuição Submarina (SDM), Módulo de Controle Submarino (SCM) e sensores.

O modelo tipo de ANM configurada para águas rasas, DLL-GL, é muito semelhante ao modelo para águas profundas descrito anteriormente. As principais diferenças entre estes dois modelos são que no DLL-GL existe um Mandril das Linhas de Fluxo, e não possui MCV, Linhas Hidráulicas, SCM e SDM no sistema de controle (o sistema de controle consiste apenas de umbilical e sensores).

- **Mandril das Linhas de Fluxo:** consiste em um mandril com perfil adequado para apoiar no berço da BAP e receber o conector da linha de fluxo fixado na ANM.

A Fig. 2 mostra os principais equipamentos do modelo DLL-GL utilizado neste estudo. Cada um dos equipamentos é composto por componentes, como válvulas, sensores, jumpers, anel de vedação, entre outros, que fazem o sistema ANM funcionar corretamente.



**Fig. 2** - Modelo DLL-GL - Sistema ANM configurado para águas rasas.

Uma vez definidas as configurações dos dois modelos, foi possível avaliar o FMECA, o que é mostrado com mais detalhes na próxima seção.

### 3. MODO E EFEITO DE FALHA E ANÁLISE CRÍTICA (FMECA)

Como afirmado anteriormente, uma das principais ferramentas usadas nas primeiras etapas para realizar a inspeção baseada em risco é a Análise de Modos e Efeitos de Falha (FMEA). Essa técnica foi desenvolvida por um engenheiro de confiabilidade na década de 1950 para analisar problemas que podem levar a falhas em sistemas militares [10]. Este método é utilizado, basicamente, para enfatizar modos de falha com efeitos importantes em relação à gravidade, capacidade de detecção e ocorrência. A extensão FMEA é chamada de modos de falha, efeitos e análise de criticidade (FMECA), que representa um método de suporte válido para medir quantitativamente a criticidade dos modos de falha do sistema [11].

Após a identificação e análise dos modos de falha, esses modos são classificados e os dados necessários para a construção de uma matriz de risco são disponibilizados. Esta matriz permite caracterizar cada modo de falha e obter o risco associado a um modo de falha.

Seguindo as etapas básicas sugeridas pelo MIL-STD-1629A [11] para a construção de um FMECA, a metodologia utilizada neste estudo foi:

**1ª Etapa:** levantamento bibliográfico sobre a indústria offshore de óleo e gás, seus respectivos riscos e os equipamentos utilizados (com destaque para a Árvore de Natal do Submarino).

**2ª Etapa:** definição do escopo de análise. Identificação do nível de decomposição sujeito a análises, funções, restrições internas e interfaces. Nesta etapa, foi feita a definição dos dois modelos de referência ANMs e seus componentes

**3ª Etapa:** Identificação dos modos e efeitos de falha: identificação dos modos de falha potenciais e definição de seus efeitos nos componentes, no sistema e na missão a ser executada.

**4ª Etapa:** avaliação das consequências. Avaliação da pior consequência potencial de cada modo de falha e a categorização de sua gravidade.

**5ª Etapa:** detecção e compensação: identificação dos métodos de detecção de falhas e provisões para a compensação de cada modo de falha.

Quanto à definição do escopo, o nível de decomposição baseou-se no apresentado no OREDA (*Offshore Reliability Data Handbook*) [12] [13] e na norma ISO 14224 [14]. Quanto à taxonomia, foi adotada a apresentada na OREDA e na norma ISO 14224.

Para definir os modos de falha, e sua respectiva fração de modo de falha e taxa de falha, para cada componente foi utilizado o OREDA [12] [13] como base de dados principal, além de dados fornecidos por fornecedores e especialistas.

RBI (*Risk Based Inspection*) é uma abordagem sistemática, estruturada e participativa para o desenvolvimento de planos de inspeção usando técnicas de gerenciamento de risco. Essa abordagem inclui associar probabilidades a mecanismos de falha e estudar suas consequências. Assim, foi realizado um estudo da pior consequência potencial de cada modo de falha - com base nos efeitos dos modos de falha - e a categorização de suas respectivas gravidades.

A estrutura FMECA usada foi baseada na Tabela 28 (DoD-US1980) do MIL-STD-1629 [11]. Portanto, para calcular a criticidade dos modos de falha (C1), a probabilidade do efeito de falha (P2), a fração do modo de falha (R1), a taxa de falha (R2) e o tempo de operação (T) foram usados, de acordo com a Equação 1.

$$C1 = P2 * R1 * R2 * T \quad \text{Eq. 1}$$

Para calcular a criticidade do item, equipamento e componentes, foram adicionados os modos de falha da criticidade do item dado.

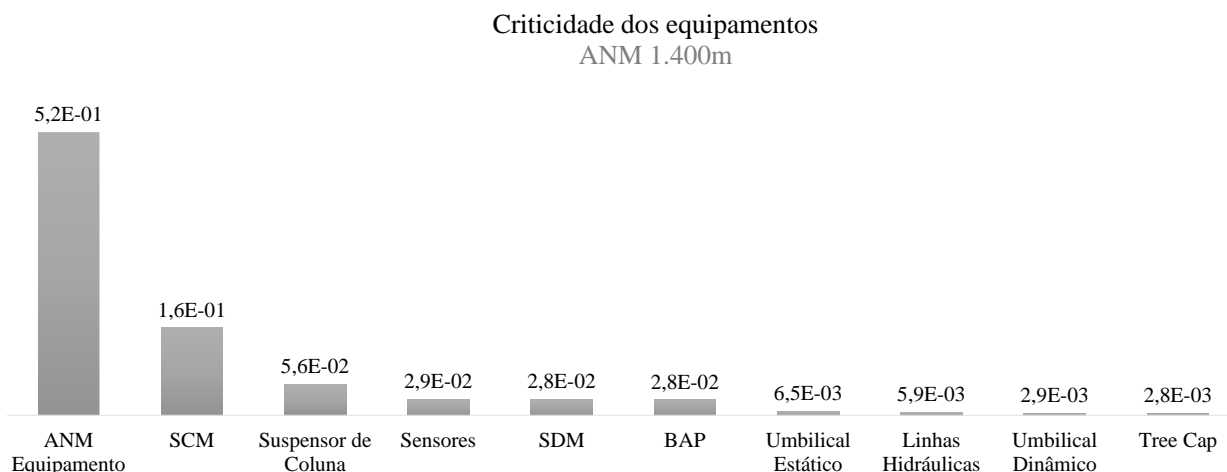
#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os principais resultados deste estudo são o levantamento e análise dos modos de falha encontrados, a classificação da criticidade do equipamento e seus respectivos componentes para os dois sistemas ANM apresentados na seção 2.2.

Para o sistema XT em águas profundas, foram encontrados 42 modos de falha diferentes, considerando todos os componentes do equipamento. Conforme visto na seção 3, é através da criticidade do modo de falha que a criticidade do item é determinada. A Figura 3 mostra o equipamento do mais crítico ao menos crítico.

Como pode ser visto na Figura 3, o equipamento com maior criticidade é a Árvore de Natal; vale ressaltar que aqui é mencionado o equipamento ANM, não o sistema, ver Figura 1.

A Tabela 1 mostra uma visão parcial do FMECA para este equipamento; os modos de falha mais relevantes são apresentados de acordo com sua criticidade, do mais crítico ao menos crítico. Não foi possível apresentar aqui o FMECA completo devido às limitações de espaço.



**Fig. 3** - Equipamentos do sistema ANM 1.400m ordenado por sua criticidade.

**Tab. 1** - FMECA ANM águas profundas - Equipamentos



Item	Modo de Falha e Efeitos de Falha			Classificação						
Equipamento	Modo de falha	Efeitos	Método detecção da falha	Classe severidade	Prob. efeito da falha	Fração modo de falha	Taxa de falhas [h]	Tempo de operação (h)	Criticidade do modo de falha	Criticidade do item
ANM	Vazamento externo - Meio do processo	Vazamento de hidrocarboneto para o mar	Sensores de pressão na linha de produção	(IV) Crítica	1	0,38	Pág. 181*	2,6E+04	1,1E-02	1,8E-02
ANM	Deficiência estrutural	Interferência entre componentes podendo levar a vazamento	Visual	(III) Média	0,5	0,12	Pág. 181*	2,6E+04	5,3E-04	1,8E-02
ANM	Operação espúria	A falsa operação pode impactar nos demais componentes	Transmissores de pressão	(II) Marginal	0,05	0,14	Pág. 181*	2,6E+04	4,0E-04	1,8E-02
ANM	Entupido/bloqueado	Não é possível interromper o fluxo	Transmissores de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,14	Pág. 181*	2,6E+04	3,5E-04	1,8E-02
ANM	Vazamento interno - Meio do processo	Não é possível interromper fluxo	Transmissores de pressão	(II) Marginal	0,05	0,13	Pág. 181*	2,6E+04	3,4E-04	1,8E-02
ANM	Vazamento externo - Meio de utilidade	Vazamento de hidrocarboneto para o mar	Sensores de pressão na linha de produção	(IV) Crítica	1	0,07	Pág. 181*	2,6E+04	3,3E-04	1,8E-02
ANM	Perda de barreira	Possível vazamento	Visual	(III) Média	0,5	0,06	Pág. 181*	2,6E+04	1,4E-04	1,8E-02
ANM	Vazamento interno - meio de utilidade	Não é possível interromper fluxo	Transmissores de pressão	(II) Marginal	0,05	0,04	Pág. 182*	2,6E+04	3,6E-05	1,8E-02

\* As taxas de falha consultadas no OREDA-2015 não são apresentadas devido à lei de direitos autorais. No entanto, esta tabela mostra o número da página onde a taxa de falha pode ser consultada no OREDA.

Conforme mostrado na Tabela 1, o modo de falha mais crítico é Vazamento Externo, em meio de processo, seguido por Deficiência Estrutural. Ambos estão relacionados ao vazamento, olhando para a coluna de efeito, no segundo modo de falha pode haver vazamento.

Conforme mencionado anteriormente, a análise realizada neste estudo estende-se ao componente; portanto, a Tabela 2 mostra os dois componentes mais críticos da Árvore de Natal em águas profundas mostrada na Tabela 1.

**Tab. 2 - FMECA Árvore de Natal em águas profundas - Componentes**

Item	Modo de Falha e Efeitos de Falha			Classificação						
Componente	Modo de falha	Efeitos locais	Método detecção da falha	Classe severidade	Prob. efeito da falha	Fração modo de falha	Taxa de falhas [h]	Tempo de operação (h)	Criticidade do modo de falha	Criticidade do item
Isolamento	Falha de Isolamento	Vazamento de fluido	Inspeção Visual com ROV	(IV) Crítica	1	1,00	Pág. 182*	2,6E+04	9,8E-01	1,1E+00
M2 (Master 1)	Entupido/bloqueado	Não é possível interromper o fluxo	Transmissores de pressão a jusante da válvula	(IV) Crítica	1	0,34	Pág. 183*	2,6E+04	2,0E-02	2,4E-02

Item	Modo de Falha e Efeitos de Falha			Classificação						
Compo nente	Modo de falha	Efeitos locais	Método detecção da falha	Classe severidade	Prob. efeito da falha	Fraç ão mod o de falha	Taxa de falhas [h]	Tempo de operação (h)	Criticid ade do modo de falha	Criticida de do item
M2 (Maste r 1)	Vazamento externo - Meio do processo	Não é possível interromper o fluxo	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	1,00	Pág. 183*	2,6E+04	1,6E-03	2,4E-02
M2 (Maste r 1)	Alto rendimento	Não é possível interromper o fluxo	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,43	Pág. 183*	2,6E+04	1,6E-03	2,4E-02
M2 (Maste r 1)	Falha ao funcionar sob demanda	Não é possível interromper o fluxo de hidrocarboneto	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	0,09	Pág. 183*	2,6E+04	7,0E-04	2,4E-02
M2 (Maste r 1)	Baixo rendimento/d esempenho	Não é possível interromper o fluxo	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,09	Pág. 183*	2,6E+04	6,2E-05	2,4E-02
M2 (Maste r 1)	Falha ao abrir/desbloq uear	Válvula não abre em demanda	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	0,00	Pág. 183*	2,6E+04	1,9E-06	2,4E-02
M2 (Maste r 1)	Vazamento externo - Meio de utilidade	Vazamento de hidrocarbonetos no mar	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	0,00	Pág. 183*	2,6E+04	1,9E-06	2,4E-02
W1 (Wing 1)	Vazamento externo - Meio do processo	Não é possível interromper o fluxo através desta válvula	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(IV) Crítica	1	1,00	Pág. 183*	2,6E+04	5,0E-03	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Falha ao funcionar sob demanda	Não é possível interromper o fluxo de hidrocarbonetos	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,65	Pág. 183*	2,6E+04	2,4E-03	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Falha ao funcionar sob demanda	Não é possível interromper o fluxo de hidrocarbonetos	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,75	Pág. 183*	2,6E+04	2,2E-03	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Desgaste anormal	Interrupção do funcionamento	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	0,07	Pág. 183*	2,6E+04	1,7E-04	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Entupido/bloq ueado	Não é possível interromper o fluxo	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,15	Pág. 183*	2,6E+04	1,3E-04	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Falha de sinal/controle	Não é possível interromper o fluxo de hidrocarbonetos	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(III) Média	0,5	0,02	Pág. 183*	2,6E+04	3,0E-05	1,0E-02
W1 (Wing 1)	Falha ao abrir/desbloq uear	Válvula não abre em demanda	Transmisso res de pressão a jusante da válvula	(II) Marginal	0,05	0,03	Pág. 183*	2,6E+04	4,3E-06	1,0E-02

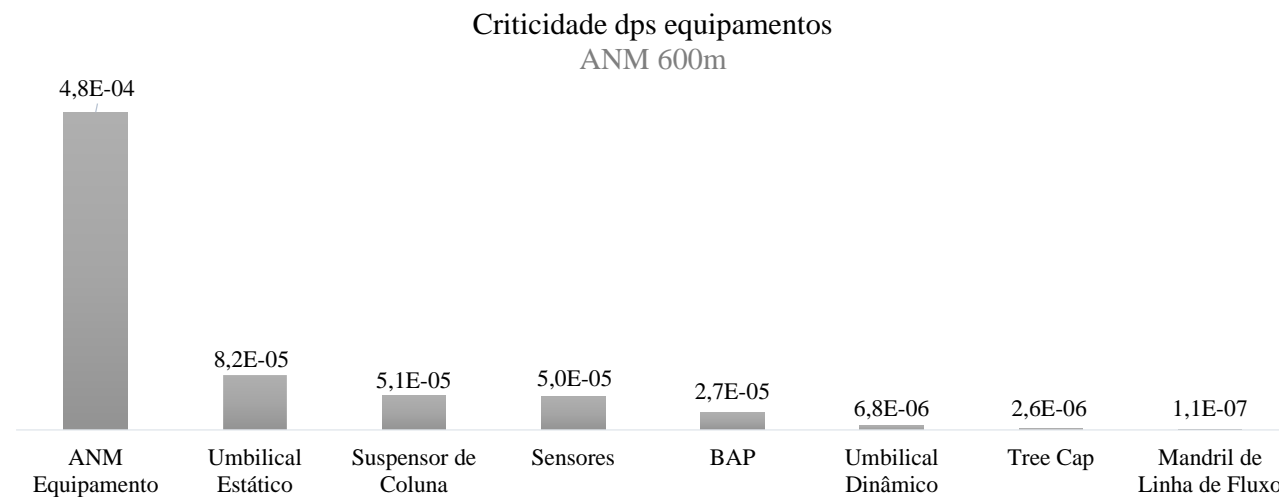
\* As taxas de falha consultadas no OREDA-2015 não são apresentadas devido à lei de direitos autorais. No entanto, esta tabela mostra o número da página onde a taxa de falha pode ser consultada no OREDA.



Olhando para a Tabela 2, pode-se notar que o componente mais crítico também está relacionado aos efeitos de vazamento. E sua criticidade é muito maior do que o segundo componente, a válvula M2. Isso pode ser verificado pelos valores de criticidade dos modos de falha.

Para o modelo DLL-GL, o equipamento mais crítico foi também o ANM, seguido pelo Umbilical Estático (ver Figura 4), que faz parte de seu sistema de controle, semelhante a ANM de águas profundas.

Em relação aos componentes, o mais crítico também foi o isolamento, seguido pela válvula M2. Dos 37 modos de falha encontrados para este sistema, os mais críticos também estão relacionados ao vazamento, tanto como modo de falha, quanto por seus efeitos.



**Fig. 4 - Modelo DLL-GL - Árvore de Natal definida para águas rasas - equipamentos do sistema ordenado por sua criticidade.**

Hoje em dia, na maioria dos casos, os planos de inspeção para este tipo de equipamento são feitos em intervalos pré-definidos (como a cada 3 anos, por exemplo) e considerando todo o sistema; entretanto, considerando os dados apresentados nos FMECAs, as inspeções estariam focadas nos índices mais críticos e, portanto, o plano de inspeção, quanto à decisão sobre o tipo e intervalo das inspeções, levaria em consideração a criticidade do item. Além disso, é possível calcular os índices de risco para este equipamento e seus respectivos componentes, e planejar inspeções para manter os índices de risco toleráveis. Vale ressaltar que sobre o RBI, o projeto de pesquisa em andamento utiliza API 580 e 581 como base [15] [16], que afirma que nesta metodologia o risco é comparado e priorizado para inspeção de risco e planejamento de mitigação. Os planos de mitigação de risco podem incluir opções além ou diferentes da inspeção real. Esta última parte descrita será a próxima etapa deste estudo.

## 5. CONCLUSÕES

Pela análise aqui apresentada, é possível verificar que a FMECA aplicada com o conceito RBI é um método eficaz para auxiliar na identificação dos equipamentos de maior risco e, conseqüentemente, na escolha eficiente da aplicação dos recursos finitos e limitados. da indústria offshore. Além disso, foram definidas duas configurações típicas de ANMs, para águas rasas e profundas. Para ambas as configurações, foram mapeados os principais modos de falhas, bem como suas probabilidades de ocorrência, suas conseqüências e seus métodos de detecção. Conseqüentemente, os equipamentos e componentes mais críticos foram mapeados em função de seus modos de falha.

Em ambos os casos, o equipamento mais crítico foi aquele associado à ANM e ao sistema de controle, sendo o modo de falha mais crítico relacionado ao vazamento externo e, em relação aos componentes, relacionado à isolamento. Portanto, seria um dos componentes que, na próxima etapa da análise, tenderia a uma classe de maior risco e, portanto, deveria ser priorizado nas políticas de fiscalização.

Quanto às limitações e desafios para a aplicação do modelo, os principais foram a obtenção de dados históricos confiáveis, enfaticamente relacionados à probabilidade de detecção dos modos de falha, uma vez que os estudos que os fornecem são extremamente raros. Vale ressaltar que as técnicas de inspeção estão em constante mudança e não é possível encontrar muitas informações sobre elas, por isso seria interessante ter um

banco de dados da própria organização para que fosse possível refinar esta análise. Finalmente, esses dados podem contribuir para uma análise de sistemas semelhantes, como ANMs verticais, e fornecer políticas de RBI mais eficientes.

## 6. REFERÊNCIAS

- [1] F. S. L. Leite, "Sistema de gestão de segurança de processo baseada em risco na indústria do petróleo," Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.
- [2] J. F. M. Moreira, "Acidentes na indústria de petróleo e seus impactos na segurança operacional e preservação ambiental," Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2017.
- [3] K. H. D. Tang, S. Z. M. Dawal and E. U. Olugu, "a review of the offshore oil and gas safety indices," *Safety Science*, vol. 109, pp. 344-352, 2018.
- [4] C. Wang, Y. Liu, W. Hou, G. Wang and Y. Zheng, "Reliability and availability modelling of Subsea Xmas trees using Dynamic Bayesian network with different maintenance methods," *Journal of Loss Prevention In The Process Industries*, vol. 64, p. 104066, 2020.
- [5] C. Zhang, Y. J. Qian, H. Y. Dui, S. P. Wang and J. Shi, "Component failure recognition and maintenance optimization for offshore heave compensation systems based on importance measures," *Journal of Loss Precention in the Process Industries*, p. , 2020.
- [6] M. D. J. R. Santos, *Análise de confiabilidade das principais válvulas de controle de uma Árvore de Natal subsea*, UFF-Universidade Federal Fluminense, 2017, p. 65.
- [7] D. L. C. Rangel, *Seleção de bomba centrífuga para injeção de água no poço de petróleo offshore*, Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018, p. 127.
- [8] M. Mashiba, *A influência dos parâmetros de operação e projeto no desempenho de atuação hidráulica de válvulas submarinas do tipo gaveta*, UFF-Universidade Federal Fluminense, 2011, p. 215.
- [9] J. M. Morais, "Petróleo em águas profundas - Uma história tecnológica da PETROBRAS na exploração e produção offshore. Ipea: Petrobras,," 2013. [Online]. Available: [https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com\\_content&id=18251](https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&id=18251). [Accessed 26 Fevereiro 2021].
- [10] B. Goo, J. Lee, S. Seo, D. Chang and H. Chung, "Design of reliability critical system using axiomatic design with FMECA," *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, pp. 11-21, 2019.
- [11] M. S. MIL-STD, "PROCEDURES FOR PERFORMING A FAILURE MODE, EFFECTS, AND CRITICALITY ANALYSIS". Patent 1629A, 24 11 1980.
- [12] SINTEF, Offshore Reliability Data (OREDA), 6th ed. Vol.1 - Topsides Equipment, 2015a.
- [13] SINTEF, Offshore Reliability Data (OREDA), 6th ed., Vol. 2 – Subsea Equipment., 2015b.
- [14] ISO, Petroleum, petrochemical and natural gas industries. Collection of exchange of reliability and maintenance data for equipment, ISO 14224, 2004.
- [15] API RP 580, Risk-based Inspection, 3rd Edition, 2016.
- [16] API RP 581, Risk-based Inspection Methodology, 3rd Edition, 2016.