

Sistema FIEB



PELO FUTURO DA INOVAÇÃO

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial

ROBSON CARLOS SOUZA ROSARIO JUNIOR

**PROPOSIÇÃO DE MÉTODO *DELPHI* DE EDUCAÇÃO PARA
ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DE ATIVOS *OFF*
SHORE EM AMBIENTE DE QUALIFICAÇÃO**

Salvador

2023

ROBSON CARLOS SOUZA ROSARIO JUNIOR

**PROPOSIÇÃO DE MÉTODO *DELPHI* DE EDUCAÇÃO PARA
ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DE ATIVOS *OFF*
SHORE EM AMBIENTE DE QUALIFICAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial do Centro Universitário SENAI CIMATEC como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Barros Murari.

Coorientador: Prof. Dr. Enrique Lopez Droguett.

Salvador

2023

R788p Rosário Junior, Robson Carlos Souza

Proposição de método delphi de educação para estimativa da confiabilidade de ativos off shore em ambiente de qualificação. / Robson Carlos Souza Rosario Junior. – Salvador, 2023.

86 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Barros Murari.

Coorientador: Prof. Dr. Enrique Lopez Droguett.

Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) – Programa de Pós-Graduação, Centro Universitário SENAI CIMATEC, Salvador, 2023.

Inclui referências.

1. Educação. 2. Modos de falhas. 3. Confiabilidade. 4. Pré-sal - Brasil. I. Centro Universitário SENAI CIMATEC. II. Murari, Thiago Barros. III. Droguett, Enrique Lopez. IV Título.

CDD 620.00452

CENTRO UNIVERSITÁRIO SENAI CIMATEC

Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia Industrial

A Banca Examinadora, constituída pelos professores abaixo listados, aprova a Defesa de Mestrado, intitulada "PROPOSIÇÃO DE MÉTODO DELPHI DE EDUCAÇÃO PARA ESTIMATIVA DA CONFIABILIDADE DE ATIVOS OFF SHORE EM AMBIENTE DE QUALIFICAÇÃO" apresentada no dia 05 de maio de 2023, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Gestão e Tecnologia Industrial.

Digitally signed by:
Thiago Barros Murari
CPF: *** 893 1 8999**
Date: 05/05/2023 11:31:48 AM -03:00

Orientador: **Prof. Dr. Thiago Barros Murari**
SENAI CIMATEC

Electronicly signed by:
Enrique Andria
CPF: *** 893 8 25 **
Date: 02/02/2023 7:25:48 AM -07:00

Coorientador: **Prof. Dr. Enrique Lopez Droguett**
UCLA

Assinado eletronicamente por:
Herman Augusto Lepikson
CPF: *** 120 82 1 1 1000 4949

Membro Interno: **Prof. Dr. Herman Augusto Lepikson**
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Alex Alisson Bandeira Santos
CPF: *** 180 785 **
Date: 12/03/2023 11:17:39 -03:00

Membro Interno: **Prof. Dr. Alex Alisson Bandeira Santos**
SENAI CIMATEC

Assinado eletronicamente por:
Celso Luiz Santiago Figueirôa Filho
CPF: *** 893 899 **
Date: 05/05/2023 08:57:34 -03:00

Membro Externo: **Prof. Dr. Celso Luiz Santiago Figueirôa Filho**
G-RAMS

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus todo o incentivo que recebi da minha família, minha mãe e filha Marina, tia fia e da minha querida esposa Silvia. Muito feliz por ter me propiciado o *networking* com colegas de alto nível de conhecimento durante esta etapa da minha vida, contando sempre com o apoio do SENAI CIMATEC no desenvolvimento desta pesquisa.

Expresso meus sinceros agradecimentos ao Colegiado do Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial do SENAI CIMATEC por acreditarem na minha capacidade.

RESUMO

Os estudos em confiabilidade no ambiente de produção de petróleo do pré-sal brasileiro têm se mostrado promissores, percebido em pesquisas feitas entre 2017 e 2023 nas plataformas *MaintWorld*, *Machinery and Equipment MRO*, *Science Direct*, *Google Academic* e *CAPES*, principalmente para a determinação das frequências de ocorrência dos eventos de falhas, obsolescência de dados e seu comportamento ao longo do tempo é uma das preocupações no contexto da engenharia atual. Essa dissertação discorre sobre uma pesquisa de confiabilidade de equipamentos em um laboratório de confiabilidade e qualificação que testa e simula as condições de operação encontradas no ambiente da cadeia de petróleo e gás. A partir disso, a problemática determinada foi identificada pautando-se no seguinte questionamento: quais as potenciais falhas e como calcular, de forma expressa, a confiabilidade dos equipamentos neste laboratório, visto que temos uma escassez de dados de falhas dos ativos nas condições adversas de pressão, vazão e temperatura dispostas neste ambiente? Os resultados foram alcançados a partir do objetivo geral, que propõe identificar a taxa de falha resultante a partir da educação da opinião dos especialistas utilizando o modelo *Delphi* para determinação da confiabilidade na área de testes com líquidos deste laboratório de qualificação e confiabilidade.

Palavras-chave: Educação; modos de falhas; confiabilidade; Pré-sal - Brasil.

ABSTRACT

Delphi elicitation method proposal for estimating the reability of off shore assests in a qualification environment

Reliability studies in the Brazilian pre-salt oil production environment have shown promise, as seen in surveys carried out between 2017 and 2023 on the platforms MaintWorld, Machinery and Equipment MRO, Science Direct, Google Academic and CAPES, mainly for the determination of frequency of occurrence of failure events, obsolescence of data and their behavior over time is one of the concerns in the context of current engineering. This dissertation discusses a survey of equipment reliability in a reliability and qualification laboratory that tests and simulates the operating conditions found in the environment of the oil and gas chain. From this, the determined problem was identified based on the following question: what are the potential failures and how to expressly calculate the reliability of the equipment in this laboratory, since we have a shortage of data on asset failures in adverse conditions of pressure, flow and temperature arranged in this environment? The results will be reached from the general objective, which proposes to identify the failure rate resulting from the eduction of the opinion of the specialists using the Delphi model to determine the reliability in the area of tests with liquids of this qualification and reliability laboratory.

Keywords: Elicitation; failure modes; reliability; pre-salt- Brazil.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CRITÉRIOS PARA CLASSIFICAÇÃO DOS ESPECIALISTAS	53
TABELA 2 - PESO ADOTADO PARA A PONTUAÇÃO DO ESPECIALISTA	53
TABELA 3 - PONTUAÇÃO DOS ESPECIALISTAS ENTREVISTADOS	54
TABELA 4 - RESULTADOS PARA O MODO DE FALHA DE DANOS NOS MANCAIS DA BOMBA	56
TABELA 5- TAXAS DE FALHA DA BOMBA CENTRIFUGA	57

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - RESERVATÓRIOS DO PRÉ-SAL BRASILEIRO	15
FIGURA 2 - HIERARQUIA PARA ELABORAÇÃO DA ÁRVORE DE ATIVOS	22
FIGURA 3 - CONFIGURAÇÃO EM SÉRIE	24
FIGURA 4 - CONFIGURAÇÃO EM PARALELO	25
FIGURA 5 - ESTRUTURA MISTA	25
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DE UM SISTEMA COM REDUNDÂNCIA	26
FIGURA 7 - PROCESSAMENTO <i>DELPHI</i>	35
FIGURA 8 - DIAGRAMA DA METODOLOGIA UTILIZADA	43
FIGURA 9 - ARVORE DE ATIVOS DO LDP	45
FIGURA 10 - ALGORITMO PARA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE CRITICIDADE ABC	47
FIGURA 11 - FORMULÁRIO DE EDUCAÇÃO	52

LISTA DE QUADRO

QUADRO 2 - TESTES A SEREM REALIZADOS NO AMBIENTE DE PESQUISA	39
QUADRO 3 - ANALISE DE CRITICIDADE DA ÁREA DE LÍQUIDOS DO LDP	48
QUADRO 4- EXEMPLO DE FMEA DO PROJETO LDP	49

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
API	<i>American Petroleum Institute;</i>
BSW	<i>Basic Sediment and Water</i>
DFR	<i>Design For Reliability</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i> (Análise de Modos e Efeitos de Falha)
FTA	<i>Failure Tree Analysis</i> (Análise de Árvore de Falhas)
IOC	<i>International Oil Company</i> (Companhia Internacional de Petróleo)
ISO	International Organization for Standardization
MTBF	<i>Mean Time Between Failures</i> (Tempo Médio Entre Falhas)
MTTF	<i>Mean Time To Failure</i> (Tempo Médio Até a Falha)
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
OREDA	<i>Offshore and Onshore Reliability Data</i> (Dados de Confiabilidade <i>Offshore</i> e <i>Onshore</i>)
PHM	<i>Prognostics and Health Management</i> (Prognóstico e Gestão da Saúde)
RBD	<i>Reliability Block Diagram</i> (Diagrama de Blocos de Confiabilidade)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Definição do problema	18
1.2 Objetivo geral	18
1.2.1 Objetivos específicos	18
1.3 Justificativa	19
1.4 Limites e Limitações	19
1.5 Hipótese	19
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 Confiabilidade	20
2.1.1 Confiabilidade de sistemas e componentes	21
2.1.2 Diagrama de blocos de confiabilidade	23
2.2 Educação da opinião de especialistas	28
2.3 Método <i>Delphi</i> de educação	32
2.3.1 Construção da pesquisa pelo método	36
2.3.2 Painel de especialistas	37
2.3.3 Prós e contras do método	37
3 MATERIAIS E MÉTODOS	39
3.1 Materiais	39
3.2 Método	42
3.2.1 Taxonomia hierárquica dos ativos	44
3.2.2 Análise de criticidade ABC dos ativos	45
3.2.3 Análise de Efeitos e Modos de Falhas (FMEA)	48
3.2.4 Aplicação da educação	50
3.2.5 Seleção dos especialistas	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62
ANEXO I – Respostas dos Especialistas na Educação para os Modos de falhas da Bomba Centrífuga do LDP	69

1 INTRODUÇÃO

O sucesso e a efetividade da produção dos reservatórios do Pré-Sal brasileiro representam o apogeu do acúmulo de conhecimentos geofísico e geológico das bacias da margem brasileira, nos quase sessenta anos das atividades de exploração e produção. Isso foi alcançado graças à competência de exploração da companhia Petróleo Brasileiro - PETROBRAS na busca pela autossuficiência petrolífera do país, endossada com as características positivas do Pré-Sal brasileiro: alta produtividade, volume acumulado das reservas, qualidade do gás natural e do óleo e o baixo risco exploratório e de produção.

Segundo a Agência Nacional de Petróleo (ANP, 2021), as reservas de petróleo do Brasil são estimadas e comprovadas em 13,24 bilhões de barris, atrás apenas da Venezuela, na América do Sul, sendo que cerca de 96% desses recursos estão no mar. Aliado a isto, localizada na bacia de Campos, o país possui a segunda maior reserva de gás natural da América do Sul. A exploração e produção de petróleo e gás *offshore* não é nova, mas foi descoberta em grande quantidade até 2006. Ambos os números atingiram o mesmo nível em 2015, todavia no ano anterior, o Brasil extraiu do pré-sal 179,8 milhões de barris de petróleo e 6,3 bilhões de metros cúbicos de gás (*ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION*, 2015).

Percebe-se que a alavancagem da economia brasileira antes da crise iniciada em 2011 estava fortemente integrada com o segmento de óleo e gás, que atende por cerca de 60% da oferta de energia do Brasil. Impulsionado pelo aumento do uso de eletrodomésticos, o consumo de energia elétrica nas residências quase dobrou entre 2010 e 2011 (*ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION*, 2015) e as principais descobertas de petróleo e gás no Brasil ocorreram nos supercarros de carga da década de 2000 (KENC; ERDEM; ÜNALMIS., 2016). Isso foi beneficiado em grande parte pelo aumento da demanda principalmente das economias emergentes na China e no Brasil.

Essas propriedades agrupadas geraram dois eventos distintos criados pelo Estado brasileiro, primeiro em 2010 realizou-se a adoção de um modelo regulatório para a exploração e produção nos reservatórios de hidrocarbonetos que objetivava a maximização do aproveitamento do excedente econômico, por meio da maior captação da renda produzida pelo Estado nacional e do fortalecimento da Petrobrás. O segundo, seis anos depois, com a aprovação do fim da obrigatoriedade da Petrobrás em explorar e produzir em todos os campos do Pré-Sal brasileiro.

Vários autores (SICSÚ; DE PAULA; MICHEL, 2007; ERBER, 2010; BRESSER-PEREIRA, 2011) determinaram que os países economicamente desenvolvidos adotem

políticas industriais que focam no investimento nacional, estratégia tecnológica de inovação da indústria e conteúdo regional, representando diferentes perspectivas, incluindo petróleo e gás natural.

O Brasil também possui requisitos rígidos de conteúdo local. Para certificar-se do cumprimento dessas medidas, um ambiente local de certificação e controle de conteúdo foi construído pela ANP. Ao licitar novos blocos, os potenciais investidores são direcionados a assinar contratos com alto percentual de conteúdo local. A Resolução da ANP n. 19 de 14 de junho de 2013 define a certificação de conteúdo local, agora substituída pela resolução 26/2016, que considera que “a cláusula dos referidos contratos estabelece que as atividades de certificação sejam executadas por entidades devidamente acreditadas pela ANP, com base em critérios previamente definidos pela própria Agência.” (ANP, 2016) Embora a Petrobrás tenha dominado algumas tecnologias de exploração *offshore*, muitas das ferramentas altamente complexas necessárias para explorar os recursos do pré-sal muitas vezes não estão disponíveis no Brasil.

A diminuição do intervencionismo estatal resultou da junção de fatores que estão inseridos na Geopolítica e no Mercado Internacional do Petróleo, nos quais podemos destacar: as consideráveis alterações que o mercado internacional do petróleo sofreu a partir de 2014, sobretudo, com a drástica redução da cotação do barril de petróleo no mercado internacional, que acarretou nas mudanças de investimentos em exploração e produção de hidrocarbonetos das maiores companhias de petróleo no mundo, direcionando os investimentos para as províncias petrolíferas mais rentáveis, como o Pré-Sal brasileiro.

A figura 1 ilustra a localização dos principais reservatórios do Pré-Sal no Brasil.

Figura 1 - Reservatórios do Pré-Sal brasileiro.



Fonte: (RICCOMIN; SANT'ANNA; TASSINARI. 2012).

Desconsiderando detalhes contratuais ou de legislação de cada país onde o campo esteja localizado, a exploração de um campo de Pré-Sal brasileiro é dividida em algumas etapas, sendo que uma dessas compreende a instalação dos ativos submarinos de produção e a produção de óleo e gás. Devido ao resultado financeiro significativo proporcionado por essa exploração, é amplamente reconhecido que os sistemas de um poço de petróleo contêm centenas de equipamentos que são fundamentais para que o processo produtivo ocorra com alta confiabilidade(RICCOMIN, 2012). Ele também acredita que isso justifica a necessidade substancial de investimento na aquisição de ativos e no estudo exploratório para mitigar as falhas, a fim de que a empresa que os utiliza e explora, possa obter uma receita substancial.

A exigência do governo federal para essa mudança é adequar as regras de acordo com a realidade do mercado e da indústria de óleo e gás e ao mesmo tempo flexibilizando o acesso de empresas estrangeiras a esse setor, criando assim maior capacidade tecnológica e produtiva, que é a grande força motriz para novos investimentos e promover o desenvolvimento da indústria (ANP, 2020).

Como a estatal Petrobrás em 2016 estimou que sua produção de petróleo e gás atingiria 3,1 milhões de barris de petróleo equivalente por dia no ano de 2021, resultou em uma queda de 30% em relação ao seu planejamento anterior. As crises econômicas e política do Brasil certamente afetaram a forma como o país se conecta com as Redes De Produção Globais (RPGs) de petróleo e gás, justificado por, antes de 2011, o setor de petróleo e gás do Brasil estava prosperando.

De fato, o número de empresas nesse ramo aumentou acentuadamente ao longo dos anos 2000, principalmente na segunda metade da década, ou seja, após a descoberta de recursos externos significativos. Diante da necessidade de investimentos na área de pesquisas no segmento, a ANP concedeu autorização a PETROBRAS e apoiado pela Shell para realizar investimentos referentes às atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação constantes do plano de trabalho do projeto da corporação. Surgiu então, o Laboratório de Desenvolvimento de Produção para Qualificação e Confiabilidade de Equipamentos e Sistemas de perfuração, Completação e de Poço, intitulado "LDP" que será construído no SENAI CIMATEC PARK e apresenta-se como um moderno complexo de inovação, pesquisa e tecnologia preparado para apoiar o desenvolvimento das empresas industriais do Brasil e do exterior, a partir de patamares internacionais de competitividade.

Os parâmetros ambientais e de manutenção âmbito relevante para norteamento da pesquisa são únicos em nível mundial, por exemplo com testes com pressões de 68.947.590,87 Pa e temperatura variando de 4 a 150° C, além de vazões padrões de líquido $9,53 \times 10^6$ litros na circulação de fluidos inertes (líquidos e gases) em poço e bancada de superfícies. Contudo os testes no laboratório terão baixa frequência, de forma que o LDP terá, em média, apenas 25% de operação durante 1 ano de atividade, por exemplo, o que o torn

também de caráter particular referente a disponibilidade física e corpo de profissionais com *background* para este cenário.

Ao avaliar as normas da área de O&G, destaca-se a API 17N que trata sobre “prática recomendada para confiabilidade do sistema de produção submarina, risco técnico e gestão de integridade” que tem como premissa a avaliação de confiabilidade de um equipamento ou sistema funcional e destaca que é importante o histórico e dados de falhas condizentes com a realidade operacional. (STRUTT; WELLS, 2014). Importante destacar, também que nem sempre é possível a obtenção desses dados relevantes em repositório e com distribuições condizentes com a operação do laboratório, e essa restrição e/ou escassez de dados para a realidade operacional do LDP, que visa simular as condições encontradas em ambientes de águas profundas se torna um entrave na avaliação da confiabilidade do ativo ou sistemas.

Embora haja um volumoso histórico de falhas oriundos do projeto *Offshore and Onshore Reliability Data* (OREDA), que é uma base de dados que possui informações sobre operação e manutenção de diversos equipamentos da indústria do petróleo, utilizadas como referência internacional para cálculos de confiabilidade, a taxa de falha constante e os parâmetros/condições operacionais diferentes das necessidades dos sistemas e equipamentos em análise do LDP foram restrições encontradas nesse repositório tão utilizado pela cadeia petrolífera.

Nesse contexto, a exploração de opiniões de especialistas tem se estabelecido como um campo de pesquisa de extrema importância em diversas situações, devido à sua abordagem metódica e criteriosa, como estudos de pesquisadores em análise de confiabilidade humana (HALLBERT *et. al.*, 2004), em redes de crenças bayesianas (PEARL, 1988) e sua hibridização (DROGUET; MOSLEH, 2006) em que requerem o uso desses dados coletados dos profissionais técnicos para análises quantitativas, isto porque os dados empíricos existentes são insuficientes para os equipamentos *offshore* do Pré-Sal Brasileiro nas condições que estarão submetidas nessa pesquisa e que sejam capazes de cumprir todos os parâmetros de modelo exigidos.

Diante desse cenário foi necessária a utilização de outras fontes alternativas de identificação e análise de falhas, dentre elas neste estudo utilizamos a Análise de Modos de Falhas (FMEA) e a educação, popularmente conhecida como elicitación da opinião de especialistas, fundamentado no modelo Bayesiano e método *Delphi*.

Justificada pela escassez de dados empíricos relativos aos conceitos desenvolvidos, essa pesquisa visa recorrer à educação de especialista para obter estimativas da taxa de falha dos conceitos desenvolvidos. Trata-se de um método de educação direto, baseado no método *Delphi*,

com a possibilidade de reavaliação das respostas no decorrer das rodadas. A vantagem deste método reside em evitar os potenciais vieses, além do confronto entre os especialistas e apresenta como resultado principal a busca pelo consenso entre os especialistas.

Essa análise também avalia que, mesmo os eventos que não contribuírem para uma parada imediata da produção, certamente poderão levar à perda de produtividade do sistema com potenciais impactos na eficiência do sistema de circulação de fluidos e até mesmo na confiabilidade dos testes nos ativos.

1.1 Definição do problema

Como fazer um análise de confiabilidade de equipamentos com restrição de *datasets* relevante em um laboratório de qualificação de ativos tratando-se de equipamentos em águas profundas?

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral deste estudo é propor um método de educação de especialistas, baseado no método Delphi, para estimar a confiabilidade resultante de um sistema de água gelada de resfriamento no laboratório de confiabilidade e qualificação. Esse método, mais sintetizado, tem como objetivo superar as restrições de dados frequentemente encontradas em análises de incertezas de ativos offshore. O foco é aplicar esse método inovador em um ambiente de qualificação específico para a cadeia do segmento de óleo e gás, visando identificar as falhas potenciais e mais prováveis de ocorrerem durante a fase de operação. A bomba responsável pelo resfriamento dos processos testados no laboratório está localizada na área 5423, conhecida como Unidade Erosional. Dada a complexidade e os diferenciais únicos desse sistema no mundo do LDP, o estudo de confiabilidade nesse ativo assume alta importância.

1.2.1 Objetivos específicos

- Analisar os modos e efeitos de falha (FMEA) de uma bomba centrífuga de resfriamento como equipamento crítico do laboratório de qualificação e confiabilidade do SENAI CIMATEC PARK;
- Desenvolver um método adaptado de educação para calcular a taxa de confiabilidade do sistema projetado por meio do levantamento dos modos de

falha e riscos.

- Avaliar o método no sistema de bombeamento do laboratório de qualificação e confiabilidade, entrevistando os especialistas dentro do consórcio de empresas que participam deste laboratório.

1.3 Justificativa

A motivação para o desenvolvimento dessa pesquisa teve como base conhecer mais sobre os métodos de obtenção de estimativas estatísticas sem uso de dados reais a partir de educação de opinião de especialistas, visto que percebemos uma lacuna de muitas pesquisas nesse tema, para um laboratório de equipamentos da cadeia de Petróleo e Gás com relevância no SENAI CIMATEC PARK, além de uma oportunidade de imersão no processo de pesquisa com ampliação do conhecimento sobre o tema Confiabilidade e futuramente com desenvolvimento, em outra pesquisa, modelos de Redes Neurais a partir de dados preditivos para o LDP.

1.4 Limites e Limitações

- Problemas com os prazos estabelecidos na pesquisa de educação;
- Público-alvo da educação não alcançado ou baixo aprofundamento técnico na pesquisa;
- Escassez de informações ou dificuldade em encontrar dados de falha de equipamentos *offshore* relevantes para o cenário do laboratório;

1.5 Hipótese

Esse método *delphi* de educação mais sintetizada objetiva para estimar a confiabilidade, quando restrição de dados para uma análise das incertezas de ativos *off shore*, em um ambiente de qualificação para cadeia do segmento de óleo e gás.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Durante a análise do estado da arte sobre o tema foi possível a partir do mapeamento de toda a produção acadêmica sobre esse assunto específico a nível mundial, a localização de artigos, teses, dissertações e outras publicações úteis para a pesquisa. Por exemplo, no período de 06 de abril de 2021 a 13 de fevereiro de 2023, após investigação nos portais do Google acadêmico, CAPES, Science Direct, e as revistas eletrônicas Maint World e MRO verificou-se pouquíssimas pesquisas que abordam sobre o tema. Portanto, podemos inferir que este é um tema pouco explorado e, por isso, considera-se relevante tanto para a pesquisa científica, quanto para o mercado industrial que se possa alcançar uma análise de confiabilidade do sistema de circulação de fluidos, mesmo sem possuir o histórico de dados de falhas para os seus equipamentos *offshore* nas condições encontradas para o LDP.

2.1 Confiabilidade

Avaliando qualitativamente, a confiabilidade pode ser caracterizada como a habilidade do item não falhar ou permanecer em funcionamento. De acordo com Birolini (2007), em seu livro “*Reliability Engineering Theory and Practice*”, a confiabilidade é a característica de um item, expressada na forma de probabilidade de desempenhar uma função requerida sob dadas condições dentro de um intervalo de tempo definido. Já temos de conceito também que a “Confiabilidade de um sistema é a probabilidade de que, quando em operação sob condições ambientais estabelecidas, o sistema apresentará uma performance desejada (sem falhas) para um intervalo de tempo especificado” (PIAZZA, 2000, p.14). O estudo da confiabilidade quantitativa é fundamentado em métricas envolvendo o tempo até um dado item falhar. Conforme PIAZZA (2000) tais premissas permitem conceituar e quantificar o comportamento dos dados de forma a caracterizar o desempenho do item monitorado, são algumas delas:

- “Taxa de Falha $\lambda(t)$: Probabilidade temporal de um ativo falhar dado que este mesmo item não falhou até o momento”.
- “Confiabilidade, $R(t)$: Probabilidade de o ativo funcionar até um determinado tempo (t);”
- “Probabilidade de Falha, $F(t)$: Probabilidade de o ativo falhar até um determinado tempo (t);”

- “Vida Média *Mean Time To Failure* (MTTF): Tempo médio para uma falha surgir em um ativo ou ainda para um equipamento reparável pode ser chamado de - *Mean Time Between Failure* (MTBF);”
- “Função Densidade Probabilidade (FDP): Função que descreve a verossimilhança de uma variável aleatória tornar um valor dado, também conhecida como densidade de uma variável aleatória contínua”.

Para que essas métricas agreguem valor à análise dos dados é importante que uma base de dados seja utilizada para nivelamento a fim de proporcionar tomadas de decisão assertivas (SIGNORINI, 2019). Para este autor, na indústria de petróleo e gás, o banco de dados OREDA é amplamente utilizado, uma vez que contém 39 dados sobre falhas de equipamentos e componentes críticos na vida de um poço de petróleo.

2.1.1 Confiabilidade de sistemas e componentes

A confiabilidade dos componentes de um sistema afeta diretamente o desempenho dele, a depender de como são utilizados, conectados, qualidade de produção, instalação etc. Outro conceito importante que precisa ser definido neste momento é o de falha, que, segundo o Dicionário Merriam Webster, é o estado de incapacidade de desempenhar uma função. (MERRIAM-WEBSTER, 2018). Adaptando-se à realidade industrial, podemos dizer que o dispositivo falhou, ou seja, o dispositivo entrou em um estado em que não pode desempenhar sua função. Segundo Birolini (2007), a confiabilidade de um sistema é calculada por meio de medidas quantitativas de confiabilidade, como tempo de falha, e aplicação de análise de dados de longo prazo. Este conceito é utilizado para subsistemas e componentes, o que diferencia cada sistema é sua função.

Barros Filho (2003) conceitua um sistema a seguir: Entende-se por sistema um conjunto de subsistemas e componentes, combinados entre si de modo específico, correspondentes a dados arranjos físicos (Série, Paralelos, Compostos e Complexos), para atingir as funções operacionais desejadas, com custos, performances e Confiabilidade que satisfaçam as necessidades do usuário final (BARROS FILHO, 2003, p. 53).

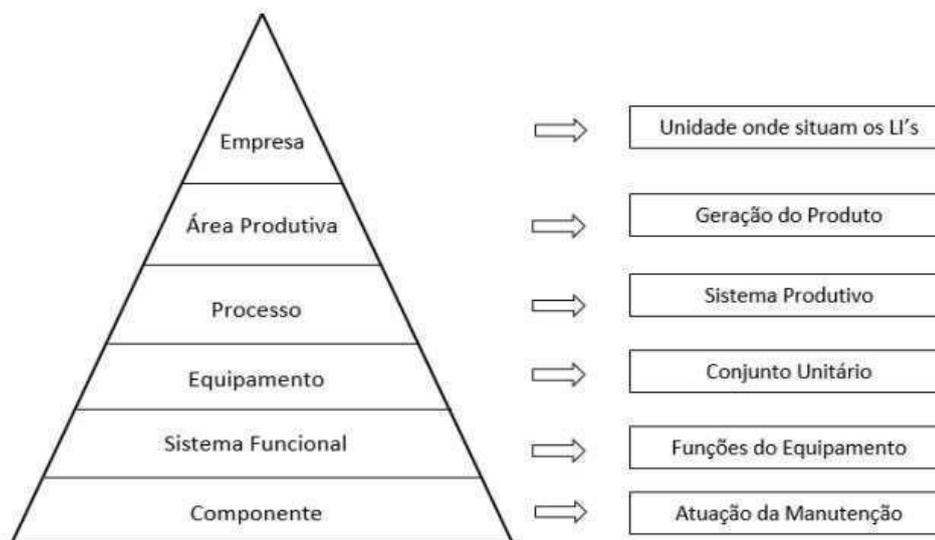
Ou seja, qualquer tipo de falha que resulte na falha de acionamento dos sensores será considerado falha do SMOV. No entanto, podem ocorrer falhas que não afetem o funcionamento do sistema, como falha do sensor de pressão que monitora a linha hidráulica dentro do SMOV. Como afirma Moubroy (2000), componentes, subsistemas e sistemas

possuem funções diferentes, e a falha na implementação de um deles pode afetar a confiabilidade dos componentes a ponto de falhar.

Essa taxonomia hierárquica compreende os ativos da empresa organizados em níveis hierárquicos e dispostos de forma a permitir a identificação do item, conforme norma NBR ISO 14224 da Associação Brasileira de Normas (2011), relacionando a sua localização física geográfica e seu papel funcional dentro das áreas de produção, apoio e administrativas. Desta maneira é possível visualizar os custos de manutenção, os sistemas produtivos, os processos e as funções ligadas aos mesmos, permitindo também, gerenciar equipamentos e os serviços nos diversos níveis da instalação e de forma independente na empresa.

A figura 2 ilustra a hierarquia da árvore de ativos.

Figura 2 - Hierarquia para elaboração da árvore de ativos.



Fonte: Próprio autor (2021)

O cadastro dos ativos é a base de todo o processo de Gestão de Manutenção, e possui a finalidade de assegurar a identificação individual inequívoca de cada item de Manutenção, possibilitando o inter-relacionamento com os sistemas e subsistemas envolvidos e a constituição do histórico de manutenção de cada item.

A posterior definição da criticidade dos ativos é uma atividade que pode ser realizada em diferentes segmentos da indústria, seja para equipamentos *onshore* ou *offshore*, visando definir a estratégia de manutenção (preditiva, preventiva, inspeção e corretiva), o planejamento de manutenção, a execução da manutenção e a aquisição e armazenagem de sobressalentes para aumento de confiabilidade do sistema.

Além disso, conforme mencionado por Helmann (2008) e Menezes (2022), é importante observar que nesse modelo é possível fazer alterações tanto nos critérios quanto na estrutura de decisão, para que respondam melhor à realidade das operações empresariais. No entanto, considera-se uma boa prática avaliar os equipamentos de acordo com os quatro grandes princípios de avaliação de criticidade: segurança e meio ambiente, produção e qualidade, econômico/financeiro e manutenção. Segundo o autor, o método de classificação ABC baseado em perguntas e respostas é "fácil e rápido de aplicar, amplamente utilizado pelos gestores assistenciais".

Por outro lado, a aplicação de critérios pode ser tediosa e cansativa dependendo da complexidade do sistema e da quantidade de objetos. A avaliação de criticidade usa diferentes alvos quantitativos como uma porcentagem do total.

2.1.2 Diagrama de blocos de confiabilidade

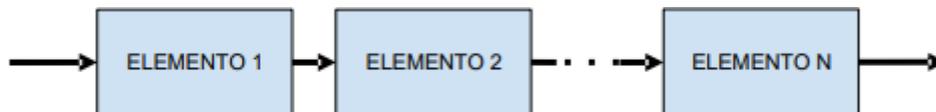
Como segundo Lafraia (2001) a confiabilidade é a probabilidade de um componente ou sistema desempenhar as funções especificadas, sob condições pré-estabelecidas, durante um período de tempo limitado, temos que quando o componente/sistema deixa de exercer a função pretendida é indicativo de que ocorreu uma falha. Pallerosi (2005) e Muller (2021) cita que esses sistemas podem ser representados por um diagrama funcional chamado Diagrama de Blocos de Confiabilidade ou Reliability Block Diagram (RBD) no qual os componentes do sistema estão interligados em várias configurações possíveis.

No entanto Strutt e Wells (2014) afirmam que a norma API 17N destaca que a relação entre o sistema e sua representação em diagrama de blocos deve ser claramente definida, antes que qualquer técnica de avaliação de confiabilidade seja aplicada. A geração de tal representação modelo de um sistema físico não terá a mesma estrutura topológica, mas resultará de como os componentes são necessários para desempenhar a função do sistema. A disposição de componentes ou elementos pode assumir muitas formas, cada uma com efeitos específicos na confiabilidade do sistema. Pallerosi, Mazzolini e Mazzolini, (2011) apresentam três configurações básicas apresentadas a seguir:

- **Estrutura série;**

Pelo entendimento do Pallerosi (2005) na configuração em série, a falha de qualquer componente leva à falha do sistema completo. Traduzindo que todas as unidades em um sistema em série devem estar em execução para que o sistema complete opere, conforme esquema abaixo. Esse tipo de configuração pode ser visualizado na figura 3.

Figura 3 - Configuração em série.



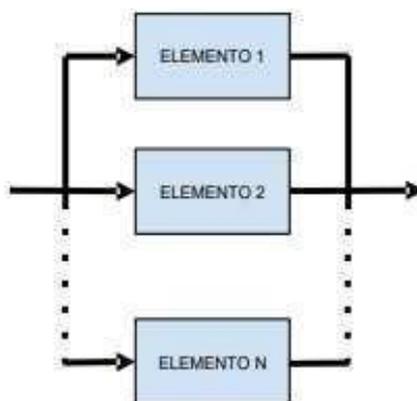
Fonte: Adaptado de Pallerosi (2005).

- **Estrutura paralela;**

Na configuração paralela, segundo Pallerosi (2005), a falha do sistema ocorre somente se todos os elementos falharem. Em outras palavras, enquanto um dos elementos do arranjo funcionar, o sistema continuará funcionando. Elementos paralelos também são conhecidos como redundância em algumas publicações. Na prática, a redundância visa aumentar a confiabilidade do sistema, tornando-o menos suscetível a paralisações não planejadas. Em sua publicação, Pallerosi (2005) afirma que a redundância é uma expressão elementar da natureza; os seres humanos possuem dois pares de membros, narinas, olhos etc. Estas redundâncias são recursos para o aumento da confiabilidade do sistema “ser humano”.

Portanto, quando um projetista aplica paralelismos em sistemas técnicos está trabalhando com 44 mecanismos de redundância para o aumento da sua confiabilidade. A configuração em paralelo está ilustrada na figura 4.

Figura 4 - Configuração em paralelo.

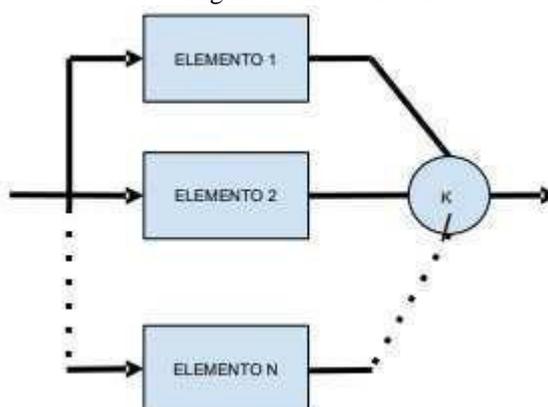


Fonte: Adaptado de Pallerosi (2005).

- **Estrutura mista**

De acordo com Pallerosi (2005) um sistema “K-em-N” é uma representação geral de dois arranjos anteriores, onde um grupo de “k” elementos deve ser totalmente funcional para que o sistema consista em um grupo contínuo de “n” elementos. O sistema em série é um dos extremos do sistema de “K-em-N” onde “k” e “n” são iguais. O outro extremo é um sistema paralelo onde “k” é igual a 1 e “n” pode ser qualquer número maior que 1. A estrutura mista pode ser visualizada na figura 5.

Figura 5 - Estrutura Mista.



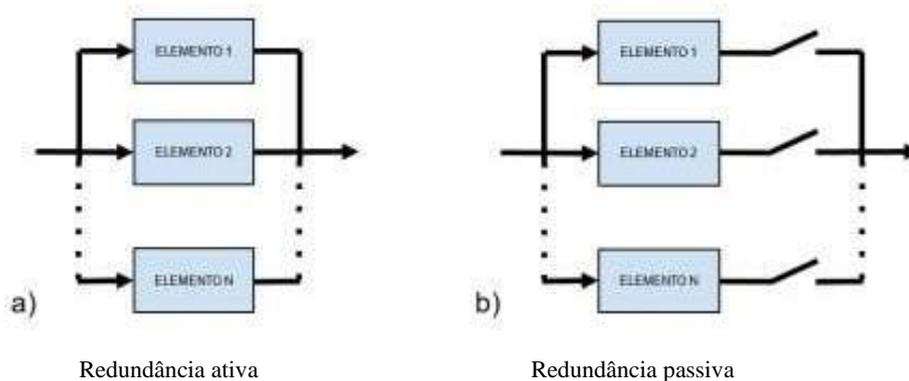
Fonte: Adaptado de Pallerosi (2005).

- **Redundância**

No entanto, podemos ter as redundâncias, por exemplo quando um elemento auxiliar entra em uso sem executar procedimentos. Eles podem ser divididos em redundância *standby*, pois os componentes "extras" (redundantes) são ativados quando os componentes ativos falham (LAFRAIA, 2001). Outra forma de redundância é quando temos um componente ou sistema redundante em uso constante, o que chamamos de redundância ativa (LAFRAIA, 2001).

Há também a redundância parcial, onde o sistema aceita um determinado número de falhas, o que a torna imprescindível para sistemas de segurança. Em síntese, nas redundâncias ativas os elementos estão conectados em paralelo e operando simultaneamente; nas passivas os elementos também estão dispostos paralelamente, porém ficam em espera até que um chaveamento os coloque em operação, conforme figura 6.

Figura 6 - Representação de um Sistema com redundância.



Fonte: Adaptado de Pallerosi (2005).

A análise de confiabilidade visa reduzir e controlar a incerteza de custos associada à escala industrial. O resultado serão informações que ajudarão as áreas de planejamento, operação e manutenção a fazer a alocação correta dos recursos necessários para manter a produção e os sistemas funcionando em níveis elevados, o que afetará diretamente os lucros corporativos.

Hoje, a confiabilidade engloba métodos e técnicas, incluindo avanços tecnológicos que ajudam a prever e diagnosticar falhas em equipamentos industriais. Entre eles podemos citar: A integração entre software e equipamentos humanos, chamados de sistemas complexos; Design para confiabilidade (DFR); *Prognostic Health Management* (PHM) para o

desenvolvimento de gêmeos digitais; Análise de *Big Data*; Análise de Crescimento de Confiabilidade de Sistemas Usáveis (RGA); Modelagem e Confiabilidade do Sistema (SRA); Análise de confiabilidade para condições extremas de uso (QALT), em seu contexto, considera usos que visam reduzir danos, pequenas intervenções, aumentar a produtividade, estimar e custear custos, melhorar a segurança e desenvolver análises de risco, além de auxiliar na melhor fabricação decisões e identificar as melhores estratégias.

Para a análise de confiabilidade, as distribuições de probabilidade são o principal substituto para os julgamentos de modelos e uma variedade de métodos de extrapolação projetados para computar a opinião de um especialista sobre uma determinada incógnita foi estabelecida. A solicitação de especialistas é essencialmente um método de consenso científico e é frequentemente utilizada no estudo de eventos raros. Sua forma especializada permite a parametrização dos objetos individuais em estudo, uma "hipótese contextualizada" para quantificar a incerteza. Galliano (1979, p.6) conceitua a educação como um conjunto cuidadosamente organizado de etapas que devem ser superadas na busca da verdade, na pesquisa científica ou na realização de algum objetivo.

Droguett e Mosleh (2006) utilizaram a análise Bayesiana para estimar a confiabilidade de equipamentos industriais em desenvolvimento, utilizando dados de sistemas similares e opiniões de especialistas sobre o impacto da mudança de projeto. O teorema de Bayes nos permite utilizar dados de evidência subjetiva, que podem ser comprovados a partir da teoria da probabilidade, onde a probabilidade de ocorrência simultânea de dois eventos depende de A e B, conforme equação 01 (MODARRES; KAMINSKIY; KRIVTSOV, 2016).

$$P(A \cap B) = P(B) \times P(A|B) \quad (1)$$

Em que:

- $P(A|B)$: probabilidade condicional
- $P(B)$: probabilidade de ocorrência do evento B.

Jaynes (2003) lista três pontos do teorema de Bayes para análise de probabilidade, a saber: representação numérica do grau de certeza ou incerteza sobre um determinado evento, correspondência qualitativa com a significância do evento e quando os dados são coletados de um evento, ou seja, sua probabilidade não é muito diferente de eventos de frequência e consistência, quando duas formas diferentes de obter um resultado têm o mesmo valor.

Historicamente, Knight (1991) relata que a evolução da confiabilidade ao longo do tempo vem sendo aplicada em sistemas de engenharia há mais de 50 anos, e no final da Primeira Guerra Mundial ela foi alcançada.

A adequação tecnológica visa estudos comparativos realizados em aeronaves, com um, dois ou quatro motores e que nesse contexto, a confiabilidade é medida pelo número de acidentes por hora de voo. Já durante a Segunda Guerra Mundial, foi diagnosticado que os protótipos de mísseis desenvolvidos falharam na fase de testes, explodindo durante o voo ou pousando antes do alvo.

Durante a década de 1970, a pesquisa de confiabilidade se concentrou na análise dos riscos associados à construção e operação de usinas nucleares. Desde então, consolidaram-se as aplicações de confiabilidade nas mais diversas áreas. Algumas dessas áreas de aplicação, relacionadas à engenharia de manufatura, foram listadas por Rausand e Høyland (2003) da seguinte forma: análise de risco e segurança, qualidade, otimização de manutenção, proteção ambiental e projeto de produto.

2.2 Educação da opinião de especialistas

Segundo KNOL *et. al.* (2010), educação é “uma abordagem estruturada de consulta a especialistas sobre um assunto onde há conhecimento insuficiente e busca explicitar o conhecimento e a sabedoria publicados e não publicados dos especialistas”. Um dos principais desafios na aplicação dessa abordagem é que os especialistas devem ter pelo menos um conceito de probabilidade. Segundo Jaynes (2003), a visão bayesiana de probabilidade é uma medida do grau de incerteza de algo ou evento, expressando a probabilidade de que determinado evento ocorra devido a determinadas circunstâncias.

A importância da opinião de especialistas para modelagem de sistemas complexos é indiscutível, onde fica claro que métodos de estimulação conhecidos não conseguiram atingir esse objetivo. O foco é encontrar o equilíbrio certo entre o consumo de tempo e a precisão. De acordo com Ayyub (2001), os métodos diretos podem produzir os piores resultados de estímulo, especialmente quando os especialistas não estão familiarizados com o conceito de probabilidade. De fato, o conceito formal de probabilidade é incomum para não-estatísticos, mesmo quando lidam com incertezas em seu dia a dia e usam algum tipo de cálculo.

As pessoas tendem a associar, pelo menos qualitativamente, níveis de probabilidade a certos eventos e, em seguida, usam esses julgamentos como informações para tomar decisões

sobre problemas cotidianos. Portanto, uma alternativa interessante é incorporar esse raciocínio probabilístico informal em um método de educação. Para Ayyub, atualmente não existe uma técnica de estimação que satisfaça todos os requisitos, sendo necessário recorrer a várias técnicas que contribuirão para a obtenção de um resultado mais eficaz. Cada técnica possui características que a distinguem de todas as outras e a tornam adequada para uma determinada condição.

Antes de usar qualquer técnica, devemos entender completamente as vantagens e desvantagens das diferentes técnicas de educação (YOUSUF; ASGER, 2015). O estímulo visa contar com a opinião de especialistas para analisar o comportamento introdutório das inovações e seu potencial. Requisitos de alta qualidade são alcançados apenas selecionando as pessoas certas e participando do processo de educação, e esses requisitos também podem ser comparados após o recebimento de solicitações dos usuários apenas para priorizá-los (YOUSUF; ASGER, 2015).

Os pesquisadores devem envolver as partes interessadas certas com base nas necessidades e no tipo de projeto para selecionar a técnica apropriada para coletar respostas do usuário. Os métodos de coleta de requisitos que podem ser usados são entrevistas, questionários, observações, desenvolvimento geral de aplicativos (JAD), *brainstorming* etc.

As técnicas citadas anteriormente e as mais comumente usadas para educação serão conceituadas abaixo.

- Entrevistas

É um método conversacional ou verbal considerado fácil e eficaz para compartilhar ideias e expressar necessidades entre analistas e stakeholders. As entrevistas são as mais empregadas e populares para a educação de requisitos. Inclui conversa face a face com uma ou duas pessoas fazendo perguntas e documentando os resultados que finalmente levam aos requisitos. Devido à capacidade desta técnica de obter conhecimento profundo, é considerada a técnica importante para obter e validar os requisitos de software. As entrevistas são de 3 tipos: Estruturadas, Semi-Estruturadas e Não Estruturadas.

Conforme Arif, Khan e Gahyyur, (2009), o objetivo dos dois primeiros métodos é adquirir dados quantitativos, enquanto o último método aponta para a compreensão das expectativas do usuário por meio de debates abertos com as partes interessadas e aquisição de dados qualitativos.

- a) Entrevistas estruturadas ou fechadas: São formais com um conjunto de perguntas pré-definidas que são preparadas e feitas às partes interessadas. É considerada uma técnica eficaz e fornece dados quantitativos. As entrevistas estruturadas não permitem a geração de novas ideias e expressões, mas são preferencialmente eficazes, de acordo com Zowghi, e Coulin, 2005. As perguntas são feitas de maneira já definida. O entrevistador precisa ser paciente enquanto ouve as respostas das perguntas e a parte interessada deve ser capaz de expressar seu conhecimento adequadamente.
- b) Entrevistas semiestruturadas: É uma combinação de perguntas pré-definidas e não planejadas. Em outras palavras, é uma mistura de entrevistas estruturadas e não estruturadas.
- c) Entrevistas não Estruturadas ou abertas: É uma entrevista informal contendo perguntas não planejadas. É uma discussão aberta entre analistas e stakeholders produzindo dados qualitativos. Mas em entrevistas não estruturadas alguns tópicos são negligenciados enquanto outros são discutidos em detalhes. As entrevistas não estruturadas são mais úteis quando a ênfase está no desenvolvimento de uma compreensão profunda de uma questão específica dentro de uma determinada comunidade, conforme Zhang e Wildemuth, (2009).

- Questionários

Considerada a forma mais barata de elicitare requisitos. Nas situações em que não são possíveis entrevistas presenciais, reuniões online com as partes interessadas, são utilizados questionários. Essa técnica é usada para coletar requisitos de um grupo maior de população distribuída em uma grande área geográfica e de diferentes fusos horários.

Na visão de Khan (2009), os questionários devem ser claros, bem definidos e precisos, além de incluir o conhecimento do domínio. Para tornar esta técnica um sucesso, um pré-planejamento rápido e atenção adequada aos detalhes são importantes. Deve ser mencionado o prazo até o qual o questionário deve ser devolvido.

- Observações

É chamada de análise social, isto porque, o pesquisador observa o ambiente do usuário sem interferir em seu trabalho, Gunda (2008). Essa técnica é utilizada quando o cliente não consegue explicar o que deseja ver no sistema, como funciona e quando alguns processos em andamento devem ser monitorados. É frequentemente usado em combinação com outras técnicas de educação de requisitos, como entrevistas.

O pesquisador visita e avisa o local de trabalho do cliente onde os serviços do sistema serão fornecidos, Gunda (2008). Os dados a serem coletados durante o processo de observação precisam ser predefinidos para que os analistas não fiquem confusos sobre qual evento deve ser registrado e qual deve ser ignorado. A observação pode ser feita ativa ou passivamente.

- JAD

As sessões JAD, desenvolvimento geral de aplicativos, são basicamente *workshops* colaborativos que duram 4-5 dias e cujo resultado é um conjunto adequado de requisitos do usuário. Isso ajuda a reunir muitas informações em um período de tempo mais curto e o pré-planejamento é obrigatório para as sessões JAD, incluindo a presença de participantes-chave.

Os participantes compartilham suas opiniões sobre o que deve ser feito e o que precisa ser mudado e todas essas sessões são gravadas. Os papéis dos participantes, os objetivos do sistema são predefinidos. Auxílios visuais como monitores também são usados para tornar a sessão interativa, de forma que os participantes sejam escolhidos com muito cuidado. Às vezes, o protótipo também pode ser o produto final da sessão JAD para refinar o sistema. Os *stakeholders* e os usuários continuam trocando suas ideias até a coleta final dos requisitos, de acordo com Ying Chen (2012).

- *Brainstorming*

É uma discussão informal onde é dada liberdade de expressão de ideias a cada participante para que um consenso seja alcançado. Os membros são de áreas diferentes e cada membro recebe um certo período de tempo para compartilhar as ideias.

Essa técnica se concentra em um problema específico e os participantes apresentam novas ideias criativas relacionadas a isso dentro de um limite de tempo prescrito. As ideias geradas são registradas; os inadequados são eliminados e os adequados são priorizados.

Para Paetsch, Eberlein e Maurer (2003), quanto mais as ideias, mais a qualidade dos requisitos. As principais vantagens do uso do brainstorming é que ele incentiva ideias e expressões inovadoras e promove a geração de práticas avançadas e recentes para questões atuais.

Não existe uma técnica perfeita que funcione em todas as situações, então uma técnica é apropriada para uma situação particular e outra funciona melhor em qualquer outra. A fraqueza de uma técnica pode ser compensada por outra, e o uso de algumas garante a descoberta da maioria dos requisitos e, assim, leva a uma estimulação eficiente dos pedidos.

2.3 Método *Delphi* de educação

Para suportar essas incertezas e tomadas de decisão, o surgimento de métodos e técnicas especializadas começou na década de 1950 em estudos prospectivos de tecnologia (HELMER-HIRSCHBERG, 1967) e depois se espalhou para diferentes campos. De importância estratégica para a Força Aérea dos EUA, pesquisadores da Research and Development, Dalkey, Helmer e Rescher desenvolveram o primeiro método para atrair especialistas: o método *Delphi* e alguns outros derivados do original, como "*Delphi Policy*" e "*Delphi Decision*" (WOUDENBERG, 1991).

O método Delphi que foi utilizado na pesquisa é uma ferramenta de entrevista que prescreve um modelo de análise sistemático e interativo no qual, com base na opinião livre e independente de um grupo de especialistas, tenta formar uma opinião oposta à opinião geral do sujeito analisado. Delphi é um método de estimulação que, de acordo com Aspinall e Cooke (2013), alcança consenso ao se submeter repetidamente a um painel de especialistas e pedir a outros, ou seja, que forneçam argumentos em apoio do ponto de vista. É uma técnica de previsão qualitativa na qual o julgamento de especialistas é combinado em uma série de etapas repetitivas/repetidas.

Os resultados de cada iteração são usados para desenvolver a próxima iteração para coletar respostas de especialistas. O *Delphi* é considerado uma das melhores ferramentas de previsão qualitativa, em que sua área de aplicação mais popular é a previsão de tecnologia, mas gradualmente se espalhou para outros campos, como gestão ou pesquisa geopolítica. Seu uso é mais indicado quando não há dados históricos relevantes ou um repositório aberto sobre o assunto em estudo ou, em outras palavras, quando faltam dados quantitativos sobre o assunto, por exemplo, dados sobre as falhas de um determinado ativo.

Assim, para a pesquisa em questão, o método *Delphi* é o processo de comunicação melhor estruturado para o grupo relativamente definido, que abordara temas sobre os quais o conhecimento natural é incerto e incompleto, segundo os especialistas, escrevem Häder e Häder (1995, p. 12). Wechsler (1978) descreve um “método *Delphi* padrão” da seguinte forma: “Trata-se de uma pesquisa realizada por um grupo de monitoramento, composto por várias rodadas de um painel de especialistas, que permanecem anônimos e cujas opiniões não são divulgadas.” Após cada rodada de pesquisa, a resposta de julgamento padrão do grupo estatístico foi calculada a partir dos quartis prognósticos únicos e médios fornecidos e, se apropriado, os argumentos e refutações das respostas. Esse método é intuitivo, interativo e envolve a associação de um grupo de especialistas em determinada área do conhecimento para responder a uma série de perguntas.

Os resultados desta primeira etapa são analisados calculando a média e o intervalo entre as partições. O resumo dos resultados é comunicado aos membros do grupo, que, após a leitura, opinam. Assim, as interações se sucedem até que se chegue a um consenso ou semi- consenso. As etapas repetidas do método são chamadas de “*loops*”, e as respostas são analisadas cumulativamente para verificar se o consenso foi alcançado e este representa o reforço dos julgamentos visuais dos participantes.

Em geral, o método “*Delphi*” se distingue por três características básicas:

- Anonimato;
- Interação com “*feedback*” controlado;
- Respostas estatísticas da equipe.

O anonimato dos participantes é uma forma de diminuir a influência de um sobre o outro, pois não se comunicam entre si no quadro. As interações com “*feedback*” controlado movem o experimento através de uma série de etapas (“*loops*”) e fornecem aos participantes um resumo da etapa anterior para reduzir o “ruído”, ou seja, o pesquisador fornece ao quadro conteúdo e pesquisas relevantes para seus objetivos. Usar uma definição estatística de resposta do grupo é uma maneira de reduzir a pressão do grupo para complacência, evitando uma ampla dispersão de respostas individuais no final do exercício. O produto deve ser uma previsão com a opinião da maioria, entretanto, também é possível produzir resultados minoritários se estes tiverem confiança na questão, ou seja maior peso na decisão. Portanto, os recursos do *Delphi* são especificados da seguinte forma, (HÄDER E HÄDER 1995):

- Abordam questões formuladas em declarações cujo conhecimento é incerto e incompleto. Se não, existem métodos mais eficazes de tomada de decisão.

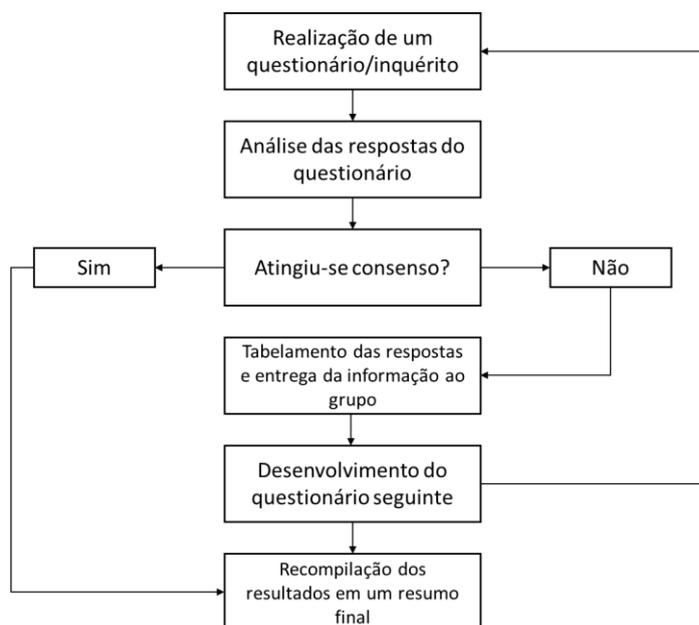
- Envolvem fazer julgamentos diante da incerteza e os participantes do estudo *Delphi* deram apenas estimativas.
- Especialistas envolvidos forão selecionados baseados em sua experiência e conhecimento para que possam avaliar competentemente com a oportunidade de coletar novas informações em etapas posteriores do processo.
- Enfatizam os processos psicológicos envolvidos na comunicação ao invés de modelos matemáticos (PILL, 1971, p. 6; DALKEY, 1968 e 1969; DALKEY; BROWN; COCHRAN, 1969; DALKEY; HELMER, 1963; KRÜGER 1975).
- Tentam usar profecias autorrealizáveis e autodestrutivas para moldar ou mesmo "criar" o futuro.

O número de "rodadas" do estudo dependerá do custo do painel, do tempo disponível para o pesquisador e do tempo disponível para os participantes. Não há requisitos mínimos ou máximos de painéis, que podem variar de pequeno a grande dependendo do tipo de questão em estudo e da população e/ou amostra que pode ser utilizada. Algumas variações podem envolver a remoção de um ou mais recursos da abordagem "*Delphi*" ou a criação de processos diferentes, o que é aceitável desde que a funcionalidade principal seja mantida.

Uma vez que várias perspectivas são recomendadas para a tomada de decisão (MITROFF; TUROFF, 2002), a técnica *Delphi* parece atraente para situações bastante diferentes no final da escala de longo prazo. Como experimentos científicos controlados mostraram que as estimativas *Delphi* não são melhores do que as de outros métodos baseados em consenso (WOUDENBERG, 1991), o poder de comunicação dos métodos *Delphi* facilita a troca de diferentes pontos de vista.

O método "*Delphi*" oferece duas vantagens para a pesquisa feita: é relativamente barato e elimina a pressão que os participantes podem sentir durante uma reunião presencial, além de que este método pode ser aplicado por correio ou via terminal de computador. O pesquisador resume a média ou a média prevista, enviando os resultados para cada provador, que pode ou não os incluí-los no relatório. Os entrevistados são orientados a revisar suas expectativas, submetendo-as para comparação com os argumentos iniciais. O processo termina quando se chega a um consenso entre os participantes. Um detalhamento do processo *Delphi* pode ser visualizado na figura 7.

Figura 7 - Processamento *Delphi*.



Fonte: Adaptado de Sousa (2018).

Como de costume para o "método *Delphi*", a primeira "rodada" consiste em questões totalmente abertas e é utilizada principalmente na resolução de problemas de longo prazo, não excluindo sua aplicação em períodos curtos, onde é necessária uma visão de futuro. Embora muitas organizações podem usar alternativas, por exemplo, empresas públicas ou privadas, organizações governamentais ou científicas ou não governamentais. É um método útil para avaliar desenvolvimentos emergentes quando não existem conjuntos de dados baseados em certeza, quando fatores externos podem ter um impacto decisivo e quando questões sociais estão presentes, podem surgir e influenciar tendências econômicas ou técnicas.

Para a identificação de forças relevantes para o futuro, reduz o conhecimento complexo e informal a uma visão mais precisa e permite ações proativas. Com isso em mente, os especialistas respondem na segunda rodada sob a influência da opinião de seus pares, o que diferencia o *Delphi* de outras pesquisas convencionais. O objetivo é que os participantes aprendam com as opiniões dos outros sem a indevida influência por quem tem mais poder ou que fala mais alto durante as reuniões. Idealmente, os principais oponentes do consenso crescente seriam solicitados a explicar seus motivos. Portanto, segundo especialistas, o método *Delphi* é um processo de produção e comunicação em grupo, em áreas onde o conhecimento disponível é precário e incompleto.

Este método é realizado por um grupo de vários ciclos composto por um painel anônimo de especialistas e com um prognóstico subjetivo baseado em consenso visual. Após cada rodada de pesquisa, as respostas estatísticas do grupo padrão são fornecidas, calculadas a

partir da média e dos quartis prognósticos únicos e, quando apropriado, dos argumentos e contra-argumentos para a resposta. Como característica central, a pesquisa *Delphi* sempre aborda questões levantadas sobre tópicos para os quais o conhecimento é incerto e incompleto e isso ajuda a justificar o seu uso, visto, também que este método envolve fazer julgamentos diante da incerteza, e as pessoas que participam de estudos *Delphi* apenas fazem estimativas. Especialistas competentes devem ser selecionados com base em seu conhecimento e experiência para que possam realizar avaliações competentes.

O método *Delphi* foca em processos comportamentais ao invés de modelos matemáticos visto que tenta usar profecias de autodestruição para moldar ou até mesmo "criar" o futuro. O *Delphi* não se destina a produzir resultados estatisticamente significativos e, de fato, os resultados fornecidos por uma tabela não predizem a resposta de uma população maior ou mesmo de outro painel *Delphi*.

Os resultados representam as opiniões de um determinado grupo de especialistas que é o objetivo dessa pesquisa. Este método não é utilizado para consensos, todavia para ver se já existe consenso sobre a forma dos itens que estão por vir. O que os usuários apreciam particularmente são os conjuntos de dados coletados do futuro e no caso de estudos nacionais baseados neste método, o público-alvo é geralmente definido como qualquer pessoa interessada em informações sobre o futuro. Portanto, além das empresas, os principais *stakeholders* são, muitas vezes, instituições de pesquisa, órgãos governamentais, jornalistas, professores e alunos.

2.3.1 Construção da pesquisa pelo método

Os tópicos devem ser aqueles que carecem de dados específicos sobre tendências futuras, em alguns casos uma área é suficiente e em muitos casos o objetivo é ter uma visão geral para que seja possível decidir e gerenciar outras áreas com flexibilidade. Existe a opção de remover, adicionar ou renomear campos e todos os procedimentos devem ser previamente estabelecidos com os questionamentos:

- Haverá reuniões de painel ou os grupos funcionarão online?
- O questionário é eletrônico ou em papel?
- Haverá mais seminários, entrevistas, apresentações?

Os procedimentos devem ser organizados, preparados e deve ser considerada a impressão de panfletos, questionários e relatórios. Ao elaborar o questionário, é importante

ressaltar como fornecer resposta aos envolvidos na segunda rodada. A abordagem usual é fornecer porcentagens ou gráficos de dados cumulativos da mesma forma que a primeira rodada de questionários. Os entrevistados são frequentemente questionados sobre o que pensavam sobre as apresentações, que podem ter vindo de pesquisas documentais ou seminários anteriores ou grupos focais. Este é um processo longo e muitas vezes é necessário filtrar os tópicos duas ou mais vezes, pois os especialistas do grupo de trabalho geralmente adicionam os tópicos em vez de subtraí-los.

A etapa final é formular perguntas derivadas dos objetivos gerais do exercício de previsão e que devem ser acomodadas. Eles devem ser claramente definidos, responsáveis e estar em conformidade com os requisitos fornecidos. As declarações devem ser redigidas de modo que os critérios ou perguntas possam ser julgados em relação a elas. Outras questões podem estar relacionadas a possíveis restrições a eventos ou desenvolvimentos (econômicos, técnicos, sociais e políticos).

2.3.2 Painel de especialistas

Deve-se ter cuidado na seleção dos grupos e no estabelecimento de critérios de seleção e antes de um especialista concordar em participar de uma investigação *Delphi*, ele deve entender o objetivo da investigação e ter em mente que sua experiência deve ser oferecida em vários estágios da investigação. A abordagem *Delphi* tem propriedades de investigador e, se essa atividade for para manter a credibilidade, a tendência dos membros da equipe de desistir após a primeira rodada deve ser minimizada.

2.3.3 Prós e contras do método

As pesquisas do *Delphi* são difíceis de fazer com total êxito, pois exigem muito tempo e esforço e exigem preparação especializada. Eles são, portanto, muito caros, e o consenso alcançado no segundo turno é muitas vezes artificial e, portanto, existe o perigo de tomar os resultados como fatos. Comentários únicos que podem ter um valor específico também são agrupados e geralmente são ignorados e apenas resultados cumulativos são publicados para proteger o anonimato. Sendo, a partir disso, difícil descobrir depois o motivo das respostas diferentes, porque esse anonimato deve ser respeitado. Um *Delphi* sem assinatura causará antagonismo e má qualidade da informação, além disso provocar críticas ao potencial ativismo

global no qual ele está envolvido. Portanto, extremo cuidado deve ser tomado na seleção dos participantes e na construção minucioso do questionário para evitar qualquer ambiguidade.

Cuidado com os efeitos do grupo, como em todos os painéis ou grupos de especialistas, os comentários devem refletir todas as partes interessadas relevantes: um conjunto limitado de critérios para esses comentários pode levar a uma opinião. Alguns participantes pulariam o processo (especialmente após a primeira rodada) e uma avaliação qualitativa adicional da pesquisa *Delphi* não seria realizada devido à falta de tempo. Geralmente é difícil convencer as pessoas a preencher o questionário seguidamente e podem ser importantes incentivos, por exemplo, especialistas recebendo retorno sobre os resultados alcançados até o momento. As taxas de abandono aumentam após a segunda ou terceira rodada, portanto, a maioria dos estudos atuais se limita à preparação das duas rodadas. Na verdade, uma busca *Delphi* é sempre uma mistura de métodos porque é necessário um procedimento cauteloso e não se aplica em todas as áreas ou circunstâncias, pois as reclamações serão apresentadas com bastante rapidez. Embora aplicável, esta fórmula concisa reduzirá bastante a complexidade do método.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse tópico é abordado o preenchimento da lacuna de pesquisa para inovação a partir da revisão da literatura, que foi mencionado anteriormente. Nele, também será detalhado o planejamento sobre a pesquisa, identificação do espaço amostral de inovação para a cadeia de petróleo e gás e a motivação para isso, além da metodologia abordada.

A partir da questão formulada e não tendo encontrado muitas respostas na literatura científica foi elaborada uma hipótese e realizada uma pesquisa para testar essa hipótese. O propósito neste item é que o leitor compreenda melhor, no tópico seguinte, os resultados encontrados, pois diferentes métodos de coleta de dados podem resultar em escalas ou amplitudes diferentes.

3.1 Materiais

O Laboratório de Testes de Qualificação e Confiabilidade de Equipamentos e Sistemas de perfuração, Completação e de Poço do SENAI CIMATEC PARK que é o espaço amostral da pesquisa, será um ambiente de inovação e pesquisa com intuito de apoiar o desenvolvimento das industriais da cadeia de óleo e gás, sendo que os principais equipamentos e tecnologia a serem testados nele serão: Válvulas de Controle de Fluxo (ICV), Válvulas de Segurança (DHSV), Válvulas de Gas Lift (VGL), Válvula de Injeção Química (VIQ), separadores de líquidos, equipamentos de medição, separadores de gases (membranas de permeação gasosa, sólidos adsorventes e tecnologia supersônica) e máquinas de escoamento multifásico. Os tipos de testes estão listados no quadro 2.

Quadro 1 - Testes a serem realizados no ambiente de pesquisa.

Infraestrutura Laboratório	Tipo de teste
Poço SIT	Integração de sistema de completção
Unidade de teste de válvulas DHSV (UTDHSV)	Teste de qualificação de válvulas DHSV
Unidade de Teste Erosional de Equipamentos de Poços (UTEPE)	Desgaste de válvulas
Unidade de Teste de Processamento de Gás Natural (UTPGN)	Separação por Adsorção
	Separação supersônica
	Separação por Membrana de permeação gasosa
Unidade de Teste de Válvula de Gas Lift (UTVGL) - módulo de desempenho	Curva desempenho de válvula de poço

Unidade de Teste de Válvula de Gas Lift (UTVGL) - módulo erosional	Vedação check valve
Unidade de Teste de Válvula de Injeção Química (UTVIQ 1 UTVIQ2)	Teste de válvula de injeção química de poço.
Unidade de Teste de Medidores Fração de Água (UBSW)	Medidor de BSW
	Nível e Interface
Unidade de Teste de Processamento e Medição de Fluidos (UTPMF)	Separação de água e óleo, separação de gás e líquido e testes de medição de fluidos.
Unidade de Teste de Equipamentos de Escoamento (UTEE)	Testes de tecnologias de tratamento e separação e de máquinas de escoamento multifásico.

Fonte: Próprioautor (2021)

Esse laboratório de testes de qualificação e confiabilidade objetiva oferecer ao mercado o espaço, a equipe e as instalações necessárias para que usuários, operadores, fornecedores ou instituições de pesquisa possam realizar testes e desenvolvimento de sistemas, equipamentos e componentes para aplicações nas condições encontradas no ambiente de produção de petróleo do pré-sal brasileiro. O mercado de petróleo e outros segmentos industriais poderão desfrutar da infraestrutura para testes de suas aplicações em condições extremas semelhantes àquelas que estarão disponíveis no ambiente. Ele é constituído e conceituado pelas áreas, equipamentos, componentes, processos e sistemas abaixo:

Área de Poços

- Poço 1: poço com 300 m de profundidade, dotado de 1 anular externo de 0,46 m e pressão de trabalho de 68.947,57 kPa, 1 anular intermediário de 0,35 m e pressão de trabalho de 68.947,57 kPa e 1 tubo de produção de 0,10 m e pressão de trabalho de 68.947,57 kPa. O arranjo permite alinhar o fluxo do sentido fundo-topo e topo-fundo em qualquer um dos produtos.

Área de Líquidos

- Tancagem de Fluido de Teste: área com 3 tanques metálicos de 400 m³ instalados em dique de contenção de concreto, com parque de 6 bombas de circulação e transferência;
- Torre de Resfriamento da Área de Líquidos: 3 células em PRFV (Plástico Reforçado em Fibra de Vidro) e bacia de concreto, com parque de 3 bombas de circulação de Água Gelada de Resfriamento, com capacidade de 46519999,34 J/s;
- Galpão de *Chillers*: 9 *chillers* de expansão direta com resfriamento, com capacidade de fornecer até 50.000 kg/h água a 4°C;
- Unidade de preparo de fluido: unidade de mistura de aditivos com capacidade de produzir até 100 m³/h de mistura de injeção com aditivos sólidos;
- Parque de bombeio de alta pressão, com capacidade de bombear até 200m³/h com pressões de descarga de até 73.000 kPa;
- Resfriador de líquidos: caixa de troca térmica atmosférica para resfriamento de líquidos com água gelada, com capacidade de 40.000.000 kcal/h e vazões de até 200 m³/h;
- Aquecedor de líquidos: para aquecimento de líquidos com fluido térmico, com capacidade de 40.000.000 kcal/h e vazões de até 200 m³/h
- Parque de válvulas de manobra: conjunto de válvulas de alinhamento do sistema de líquidos capaz de medição, interrupção e reversão de sentido de fluxo do fluido circulante.

Área de Gases

- Tancagem de nitrogênio: composta por 2 tanque criogênicos de armazenamento de nitrogênio líquido com capacidade para 50.000 kg e vaporizadores, com capacidade de fornecer até 10.000 kg/h de nitrogênio;
- Parque de compressores de nitrogênio: conjunto de 2 compressores, com capacidade pressurização de até 5000 kg/h de nitrogênio a 80.000 kPa e circulação de até 200.000 kg/h de nitrogênio a 73.000 kPa;

- Resfriador de gás: caixa de troca térmica atmosférica para resfriamento de gases com água gelada, com capacidade de 40.000.000 kcal/h e vazões de até 200.000 kg/h de nitrogênio.
- Aquecedor de gás: troca térmica atmosférica para aquecimento de gases com fluido térmico, com capacidade de 40.000.000 kcal/h e vazões de até 200.000 kg/h de nitrogênio.
- Caldeira de fluido térmico: aquecedor por combustão de diesel, com capacidade de até 40.000.000 de kcal/h e vazão de até 200 m³/h de fluido térmico a 300°C.
- Parque de válvulas de manobra: conjunto de válvulas de alinhamento do sistema de gases capaz de medição, interrupção e reversão de sentido de fluxo do fluido circulante.

Área de utilidades para Poços – uso futuro:

- Área contígua à área de gases para instalação de utilidades que servirão à Área de Poços – Uso futuro.

3.2 Método

O laboratório de qualificação e confiabilidade do SENAI CIMATEC PARK, foi o espaço amostral da pesquisa usado para realizar teste de tecnologias de poços, elevação, escoamento, processamento e medição de petróleo e gás natural. Esse laboratório de testes de qualificação e confiabilidade objetiva oferecer ao mercado do segmento de óleo e gás, a equipe e as instalações necessárias para que usuários, operadores, fornecedores ou instituições de pesquisa possam realizar testes e desenvolvimento de sistemas, equipamentos e componentes para aplicações nas condições encontradas no ambiente de produção de petróleo do pré-sal brasileiro. O mercado de petróleo e outros segmentos industriais poderão desfrutar da infraestrutura para testes de suas aplicações em condições extremas semelhantes àquelas que estarão disponíveis no ambiente, como as condições extremas do Pré-sal.

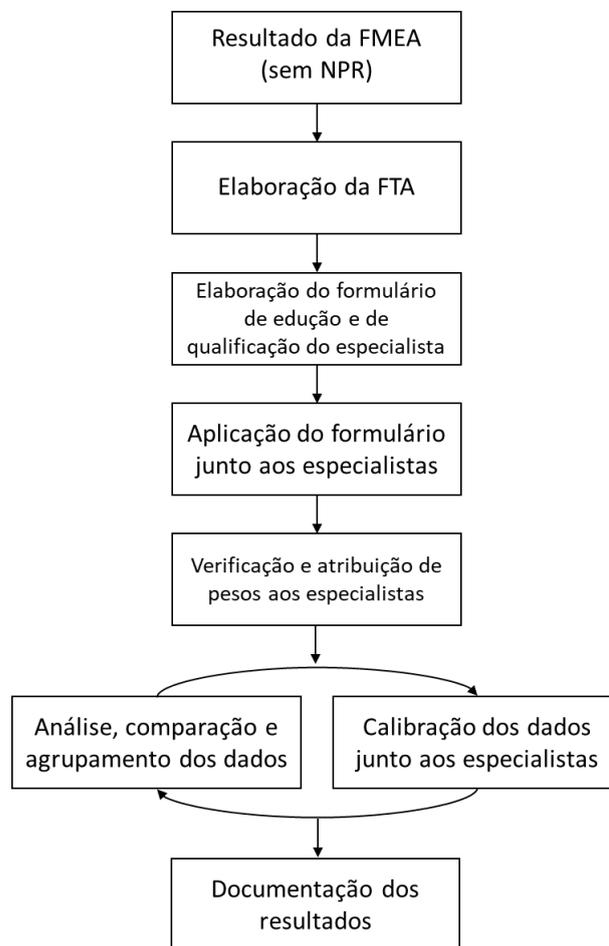
O rito para identificar as falhas potenciais que afetam a confiabilidade utilizando a opinião dos especialistas, a educação, seguiu os seguintes passos planejados:

- Estudo da documentação técnica para construção da árvore de ativos, criticidade ABC e FTA;

- Elaboração de Análise de Modo e Efeitos de Falha (FMEA) dos equipamentos críticos;
- Elaboração e aplicação do formulário de educação e de qualificação do especialista;
- Atribuição de pesos aos especialistas participantes da educação;
- Análise, comparação e agrupamento de dados, com a calibração deles junto aos especialistas;
- Documentação dos resultados da educação.

A figura 8 ilustra o processo metodológico adotado.

Figura 8 - Diagrama da Metodologia utilizada.



Fonte: Próprio autor (2022)

Importante ressaltar, que a elaboração da árvore de falhas- FTA não foi necessária, embora tenha sido planejada na pesquisa, por usar todos os modos de falhas da FMEA listados para o equipamento para então proceder com a educação para estimativa com taxa de falha resultante, sem necessariamente identificar o evento topo. O estudo iniciou com

a análise da documentação técnica do laboratório, que envolvia, principalmente: fluxogramas do processo, desenhos, lista de equipamentos, informações sobre a Política de Manutenção adotada, equipamentos similares, banco de dados contendo o histórico das ocorrências de falhas, com a data, a hora, o equipamento em que ocorreu (inclusive o componente que falhou), a causa raiz da falha, as perdas ocasionadas e os tempos e recursos para o reparo.

3.2.1 Taxonomia hierárquica dos ativos

Após imersão no processo de estudo na documentação do laboratório de qualificação e confiabilidade foi necessária desenvolver a taxonomia de ativos do LDP. No processo produtivo, cada instalação tem suas funções específicas e estas funções têm suas importâncias relativas, tendo em sua essência um cadastro que permita:

- a) Determinar os locais de instalação dos pontos de intervenção;
- b) Associar os endereços e as funções desempenhadas;
- c) Associar as instalações ao processo produtivo;
- d) Associar as funções às suas importâncias relativas;
- e) Analisar o custo de manter as funções;
- f) Analisar a disponibilidade das instalações;
- g) Facilitar o estabelecimento das prioridades para atendimento.

A partir da árvore de ativos, foi definida a seguinte estruturação, a figura 9 ilustra a hierarquia da árvore de ativos do LDP. Foram encontrados 4(quatro) processos para o LDP: área de líquidos, gases, utilidades e área de poços, no qual cada um deles é constituído por componentes funcionais diversos: tanques, bombas, trocadores, sensores, compressores e demais famílias de ativos.

Figura 9 - Arvore de ativos do LDP



Fonte: autor (2021)

3.2.2 Análise de criticidade ABC dos ativos

Após a definição da taxonomia hierárquica dos ativos de todo o LDP, foi necessário para validação da pesquisa a definição de um ativo crítico para que seja representativo e que posteriormente seja aplicado nos demais ativos do laboratório. Foi feita, então, a análise de criticidade ABC do Laboratório seguindo os passos a seguir.

Método de elaboração:

Os passos com algumas observações para elaboração da criticidade do ativo a partir do algoritmo na figura 10 são elencados abaixo:

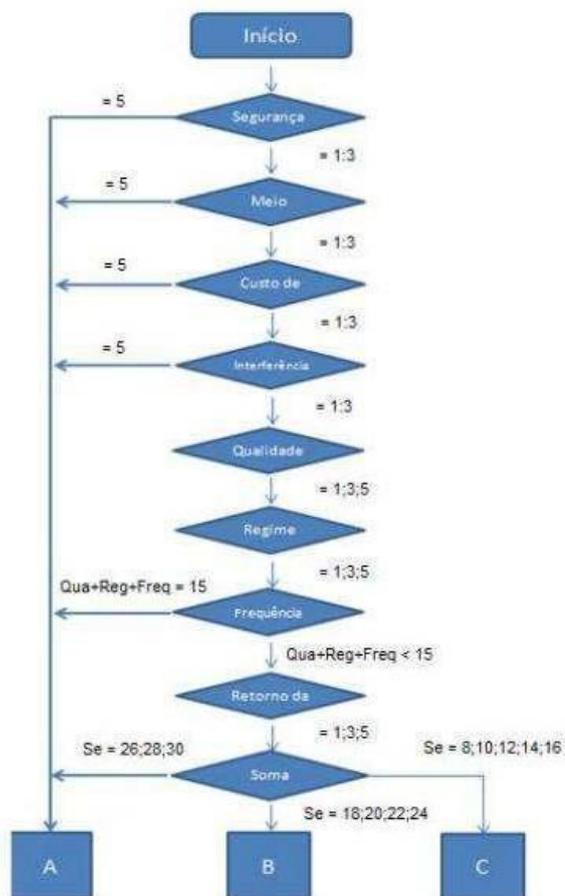
- Definir valor de referência para custo de reparo. O valor de referência corresponde ao valor do custo de manutenção (mão de obra + materiais) real médio do último ano fiscal, logo, apenas possível com o equipamento em operação;
- Submeter primeiramente ao método os locais de instalação em componente (6º nível), em seguida os locais no sistema funcional (5º nível) e finalmente os locais de equipamentos (4º nível). Importante ressaltar que não é válida a replicação da classificação de criticidade dos locais de instalação em 4º nível para os níveis

abaixo. No caso em que o 6º e 5º níveis sejam equivalentes será replicada a régua do 6º nível para o 5º nível.

- Submeter a cada atributo o critério de severidade (Grave = 5, Médio = 3 e leve = 1);
- A soma das notas dos atributos definirá um valor a ser submetido ao fluxograma do algoritmo de criticidade, no qual valores maiores ou iguais a 26 têm a maior criticidade (igual a “A”), valores entre 18 e 24 têm a criticidade média (igual a “B”) e valores iguais ou inferiores a 16 têm a criticidade baixa (igual a “C”);
- Caso o equipamento seja crítico para a segurança, meio ambiente, custo de reparo e interferência (valor igual a “5”), a criticidade “A” será considerada para a criticidade do local de instalação, independentemente da soma dos outros fatores obtidos;
- Caso o somatório de qualidade, regime e frequência seja igual a 15, a criticidade “A” será considerada para a criticidade do local de instalação, independentemente da soma dos outros fatores obtidos.

O método de elaboração está ilustrado na figura 10.

Figura 10 - Algoritmo para aplicação da análise de criticidade ABC.



Fonte: adaptado de JIPM (s.d.) e Helmann (2008)

A partir dessa avaliação foi identificado que as bombas centrífugas de água gelada seriam definidas como classe A para área de líquidos e foi usado como análise amostral do LDP para essa pesquisa e que possa validar para outros componentes, sistemas e processos inclusive por se tratar de um equipamento de maior familiaridade de modos de falha para desenvolvimento das etapas em sequência.

O Quadro 3 abaixo mostra um recorte da árvore de ativos construída do processo da área de líquidos e a definição da criticidade dos ativos no qual as bombas de água gelada se destacam como itens críticos para o processo de análise.

Quadro 2 - Análise de criticidade da área de líquidos do LDP :

 PROPOSTA ÁRVORE DE ATIVOS		
LOCAIS DE INSTALAÇÃO (AAA-AAAN-AAAN-AAAN-XXXN-AAAANN)	Empresa, Área, Processo, Equipamento, Sistema e Componente	
CODIFICAÇÃO DO ATIVO	DENOMINAÇÃO DO ITEM	CRITICIDADE
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1	CAIXA RESFRIADORA CR-5406-001	B
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO01	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0005	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO02	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0006	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO03	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0007	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO04	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0008	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO05	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0010	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO06	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0011	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO07	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0012	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO08	TUBO 7"-5406-AGA-J10-0013	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO09	TUBO 10"-5406-FLR-B3-0008	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO10	TUBO 10"-5406-FLR-B3-0011	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO11	TUBO 10"-5406-FLR-B3-0012	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO12	TUBO 10"-5406-FLR-B3-0013	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-TUBO13	TUBO 10"-5406-FLR-B3-0014	C
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-BOMB01	BOMBA DE AGUA GELADA BO-001 A	A
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-BOMB02	BOMBA DE AGUA GELADA BO-001 B	A
CPK-LQC1-LIQ1-CXR1-INDI01	INDICADOR TRANSMISSOR TEMPERATURA TIT013	C

Fonte: Próprio autor (2021)

3.2.3 Análise de Efeitos e Modos de Falhas (FMEA)

Segundo Silverman e Kleyner (2012) a FMEA é uma boa ferramenta para avaliação de risco no início de um projeto de DFR, pois identifica os potenciais modos de falha para o produto/processo, avalia os riscos associados a esses modos de falha e identifica e indica ações para minimizar ou eliminar as causas de falhas.

Segundo a norma NBR 5462 da Associação Brasileira de Normas (1994) FMEA é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto (LAFRAIA, 2001; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS, 1994). Além disso, a FMEA pode agregar a sua análise os requisitos, o uso do cliente e o ambiente de aplicação (ambiente relevante) como dados de entrada e, através das interações do grupo durante o preenchimento, pode informar resultados iniciais a respeito da física da falha, da previsão de confiabilidade e dos testes de vida.

O procedimento para a elaboração de uma FMEA da bomba centrífuga consistiu em fazer uma definição dos equipamentos/processos a serem avaliados, de modo a definir a função de cada uma delas. Em seguida, são levantados os modos potenciais de falha dessa

bomba, bem como seus efeitos e causas. A cada um desses modos de falha, são atribuídos índices de Severidade da falha, de Ocorrência e de Detecção.

Em posse desses índices, é calculado o Número de Prioridade de Risco, permitindo a definição dos modos de falha mais críticos para o processo/equipamento em análise. Por fim, ações recomendadas são levantadas para mitigar as falhas da bomba centrífuga. A FMEA também permite a definição de outros parâmetros relevantes, tais como controles de prevenção e de detecção já existentes. O Quadro 4 ilustra um exemplo de planilha FMEA.

Quadro 3- Exemplo de FMEA do Projeto LDP.

FMEA: PROJETO/PROCESSO PROJETO	ÁREAS ENVOLVIDAS: MANUTENÇÃO, PROJETO, MATERIAIS, ELETRICA						
PROCESSO/PRODUTO: BOMBA CENTRIFUGA	CLIENTE/PROJETO: LDP						
RESPONSÁVEL PROJETO/MANUFATURA:	EQUIPE:						
ITEM/NOME/FUNÇÃO DO PROJETO/ PROCESSO	MODO DE FALHA POTENCIAL	EFEITO (S) DA FALHA EM POTENCIAL	SEVERI DADE	CAUSA (S) POTENCIAL DA FALHA	OCORRÉ NCIA	DETEC ÇÃO	RISCO (NPR)
BOMBA CENTRIFUGA DE ÁGUA GELADA	Vazamento pelo selo mecânico	Distúrbio no funcionamento do sistema	3	Desgaste por atrito		1	0
		Queda de rendimento do equipamento	5	Deformação plástica na mola		1	0
			7	Deslocamento do selo mecânico		1	0
	Vibração excessiva	Distúrbio do funcionamento do equipamento	1	Desgaste por atrito dos mancais		1	0
		Queda de rendimento do equipamentos	3	Afrouxamento das conexões		7	0
			3	Desalinhamento		3	0
	Cavitação	Distúrbio do funcionamento do equipamento	5	Excesso de altura de sucção		3	0
		Queda de rendimento do equipamento	3	Alta pressão de saída		5	0
		Danos as peças do equipamento	1	Baixa pressão de entrada		1	0

Fonte: Próprio autor (2022).

Nesse trabalho, a FMEA foi aplicada por uma equipe multidisciplinar de especialistas, integrando as disciplinas de mecânica, manutenção, automação/elétrica, materiais e confiabilidade. Durante a realização da FMEA foram listados os modos de falha de cada componente, levando em consideração potenciais erros humanos e de processo, supondo a operação do sistema em ambiente relevante.

Em seguida, foram elaboradas as Análises de Modos e Efeitos de Falha (FMEA) dos componentes mais críticos. Conforme Fogliatto e Ribeiro (2011) FMEA é uma técnica cujos objetivos são identificar modos de falha em potencial de sistemas que vão entrar em operação, bem como suas causas e efeitos prováveis; quantificar o risco associado à cada modo de falha; e definir um plano de ação visando evitar a ocorrência dessas falhas por meio da

implementação de um plano de inspeção/manutenção preventiva que permita um tempo maior de reparo. Não à toa, esse método de análise de confiabilidade é amplamente utilizado na engenharia, na medida que é eficaz no desenvolvimento de produtos.

A partir das FMEAS, embora não tenhamos como definir o Número de Prioridade e Risco (NPR), pela ausência de dados de ocorrência de eventos para o ativo, foram identificados nela, os modos de falhas do equipamento que serviriam para construir o formulário de educação e determinação das taxas de falha a partir dos especialistas com avaliação de forma individual. A educação de especialistas é o método onde serão obtidos os conhecimentos e as incertezas dos especialistas, sendo assim possível sintetizar e integrar o julgamento destes.

Combinado com métodos matemáticos, a educação possibilita a aquisição de informações que auxiliam no processo de tomada de decisão na análise de confiabilidade. No estudo em questão, cada especialista opinou sobre as taxas de falha que os componentes dos respectivos conceitos poderiam assumir com informações oriundas das FMEAS e objetivo era termos respostas diferentes a partir de eduções individuais para não contaminar os resultados discutidos em grupo.

3.2.4 Aplicação da educação

A pesquisa seguirá o trajeto utilizando-se o método indutivo: partindo de constatações mais gerais (dados, informações, relações já existentes e conhecidas da educação), examinam-se casos particulares, como no ambiente qualificado do LDP, para verificar se o formulário de educação dos especialistas, conforme mostra a figura 11, se enquadra nestas constatações mais gerais e que possa ter sua utilização validada nesse ambiente exclusivo. Será apresentado o uso da opinião de especialistas e outras questões relevantes como por exemplo, calibrar os resultados obtidos através da FMEA, acerca do assunto na avaliação das incertezas em estudos de análise de risco e confiabilidade nos respectivos componentes dos ativos de circulação de fluidos.

Baseado no método *Delphi*, cada especialista responderá um questionário eletrônico (*Google forms*) atribuindo uma taxa de falha para um cenário otimista, mais provável e pessimista para cada modo de falha, semelhante ao trabalho de Droguett e Mosleh (2006), no qual, posteriormente, são calculadas as probabilidades de falha. Foram consideradas as condições normais de operação para os equipamentos, sendo os casos atípicos mensurados por

um valor de taxa de falha máximo também estimados pelos especialistas. Os resultados obtidos foram agregados com base em um valor mediano entre as taxas de falha levantadas, por ser um valor que representa melhor a tendência central.

Como citado no tópico anterior, antes da elaboração dos formulários de educação, uma análise preliminar foi realizada para o levantamento dos potenciais modos de falha da bomba centrífuga de alta pressão da área de líquidos, com capacidade de bombear até 200m³/h com pressões de descarga de até 73.000 kPa, identificada como equipamento crítico do sistema de líquidos no LDP. Tal levantamento foi equiparado com base no banco de dados do OREDA seguindo a orientação disponível na norma API 17N em reuniões multidisciplinares, bem como em planilhas FMEA similares elaboradas pelo autor em outros projetos. Como resultado, os seguintes modos de falha levantados foram: superaquecimento/emperragem; danos nos mancais; vibração/ruído; vazamento; defeito elétrico; perda de escorva após a partida; pressão alcançada insuficiente; capacidade fornecida insuficiente; e não fornecimento de líquido.

Além de reduzir a quantidade de informação necessária para a descoberta da distribuição de probabilidade, têm-se o intuito de simplificar o máximo possível as perguntas, trazendo o linguajar para perto de pessoas com pouco conhecimento estatístico e probabilístico. Em posse dos modos de falha, um questionário de educação foi elaborado, utilizando o *Google Forms*. a figura 11 apresenta o modelo final do formulário com os modos de falhas adquiridos pelo FMEA realizado, todavia sem os dados de ocorrência das causas dessas falhas para determinação, seguindo a visão dos especialistas, da probabilidade relativa da falha no funcionamento da bomba centrífuga.

Figura 11 - Formulário de Educação.

Elicitação da opinião do especialista – Bomba de Água Gelada

A - Modos de falha para funcionamento/operação da Bomba de Água Gelada

Durante a operação / funcionamento na área industrial, 09 (nove) modos de falha distintos podem ocorrer com a bomba. Partindo da suposição de que a falha durante o funcionamento ocorreu, serão atribuídos pesos a cada modo de falha, que devem caracterizar a chance de o modo ter ocasionado a falha. A soma dos pesos deve ser igual a 100%. A seguir, o modelo ilustrativo mostra como deverão ser definidos os pesos de cada modo de falha.

Na sua opinião, qual a chance relativa de uma falha no funcionamento da Bomba ser decorrente de:

	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Provável (40-60%)	Muito provável (60-80%)	Extremamente provável (80-100%)
Superaquecimento / Emperragem	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Fonte: Próprio autor (2022)

3.2.5 Seleção dos especialistas

Como na educação é dada a possibilidade de muitas opiniões, a calibração das respostas com atribuição de pesos para cada especialista torna-se um processo importante para garantir a qualidade dos resultados da educação. Na qualificação dos especialistas, explicitada com mais detalhes nos parágrafos abaixo, foi utilizado os critérios conforme Olawoyin (2017) em seu artigo *“Risk and reliability evaluation of gas connector systems using fuzzy theory and expert elicitation”*.

O processo de educação foi realizado com grupo composto por especialistas com conhecimento teórico e prático adquiridos tanto pela formação como pela experiência profissional na manutenção desse equipamento. Esses especialistas do SENAI CIMATEC e da empresa parceira do projeto do LDP foram categorizados com base em quatro critérios: nível de escolaridade, experiência profissional, cargo/ocupação e idade, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Critérios para classificação dos especialistas.

Composição	Classificação	Pontuação
Cargo	Especialista III	5
	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	4
	Especialista I / Consultor I	3
	Técnico especializado	2
	Bolsista/Estagiário	1
Experiência profissional em anos	>30	5
	20-30	4
	10-20	3
	5-10	2
	<5	1
Nível de escolaridade	Doutor	5
	Mestre	4
	Especialista	3
	Graduado	2
	Técnico/ Nível médio	1
Idade em anos	>50	5
	40-50	4
	30-40	3
	25-30	2
	<25	1

Fonte - Adaptado de Olawoyin (2017).

Vale ressaltar que embora tenhamos a pontuação alta atribuída por exemplo para doutores, mestres e cargos de liderança e gestão, importante ressaltar que todos os especialistas elicitados ou consultados na educação possuem alto nível de conhecimento em manutenção de bombas centrífugas no ambiente de petróleo e gás todavia experiência restrita na gestão de ativos com baixa operação e funcionamento como são as premissas estratégica do LDP.

Os especialistas selecionados para avaliar a probabilidade de falhas através do preenchimento do formulário de educação são das áreas de mecânica, manutenção, projetos, automação, elétrica e materiais do SENAI CIMATEC e da empresa parceira do Projeto de pesquisa, e a cada um deles foi atribuído um peso de 1 a 3 de acordo com a pontuação de obtida na classificação do especialista, como mostra a tabela 2.

Tabela 2 - Peso adotado para a pontuação do especialista.

Pontuação	Peso
4, 5, 6, 7, 8, 9	1
10, 11, 12, 13, 14,	2
15,16,17,18,19,20	3

Fonte: Adaptado de Olawoyin (2017).

Como exemplo, para o especialista 1, o peso foi de 2, a pontuação obtida foi de 14. Resultante do somatório dos pontos referente ao seu cargo (3 pontos), sua experiência profissional (5 pontos), sua escolaridade (1 ponto) e sua idade (5 pontos), conforme tabela 3.

Tabela 3 - Pontuação dos especialistas entrevistados.

ID	Cargo / Ocupação	Experiência em anos	Nível de escolaridade	Idade	Peso
1	Especialista I / Consultor I	>30	Técnico/ Nível médio	>50	2
2	Bolsista/Estagiário	<5	Graduado	25-30	1
3	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	>30	Especialista	40-50	3
4	Técnico especializado	<5	Especialista	25-30	1
5	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	5-10	Graduado	30-40	2
6	Bolsista/Estagiário	<5	Graduado	25-30	1
7	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	5-10	Mestre	25-30	2
8	Técnico especializado	5-10	Técnico/ Nível médio	25-30	1
9	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	5-10	Mestre	30-40	2
10	Líder Técnico / Especialista II/ Consultor II	10-20	Especialista	30-40	2
11	Professor adj. / Especialista III	10-20	Mestre	40-50	3
12	Especialista I / Consultor I	<5	Graduado	25-30	1
13	Especialista III	20-30	Doutor	>50	3

Fonte - Adaptado de Olawoyin (2017).

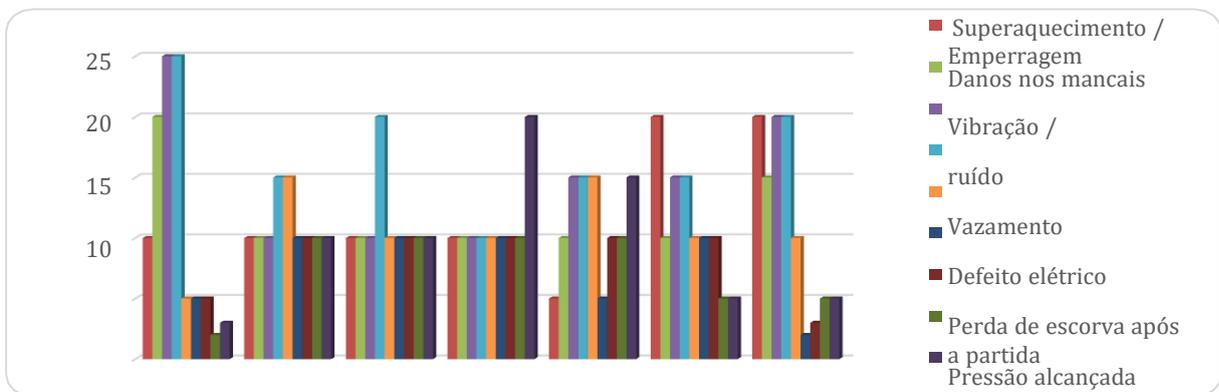
Esses pesos, então, foram utilizados para realizar a análise das respostas quantitativas. Respostas de especialistas com peso 2 foram consideradas duas vezes e as respostas com peso 3 foram consideradas três vezes para calcular um valor mediano ponderado, que representa a taxa de falha de um determinado evento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Uma vez respondidos os questionários, o levantamento da análise de taxa de falha da bomba centrífuga foi iniciado. Primeiramente, foi realizada uma análise qualitativa dos modos de falha. Para tanto, os entrevistados responderam em termos percentuais quais eram as probabilidades de a ocorrência da falha da bomba ser decorrente de um modo de falha em específico. A soma de todos os percentuais, dessa forma, deveria ser igual a 100%.

O gráfico 1 mostra o resultado das respostas qualitativas da educação sobre a contribuição dos modos de falha para a falha na bomba centrífuga. As respostas detalhadas de cada especialista podem ser encontradas no anexo I.

Gráfico 1 - Respostas qualitativas da contribuição de cada modo de falha relacionada à Bomba.



Fonte: Próprio autor (2023)

Em seguida, uma análise quantitativa de cada modo de falha foi realizada. Para tanto, os entrevistados atribuíram taxas de falha em cenários otimista (moda), mais provável e pessimista para cada modo de falha. Em posse deles, uma tabela para cada modo de falha foi elaborada, compilando todos os resultados mais prováveis. Tais resultados foram contabilizados de maneira proporcional à pontuação de cada entrevistado. A tabela 4 ilustra os resultados para o modo de falha de danos nos mancais da bomba.

Tabela 4 - Resultados para o modo de falha de danos nos mancais da bomba.

Especialista	Peso	Resposta Mais Provável	Otimista	Mais provável	Pessimista
1	3	9,13E-05	9,13E-05	9,13E-05	9,13E-05
2	3	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
3	2	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	
4	3	2,28E-05	2,28E-05	2,28E-05	2,28E-05
5	2	1,90E-05	1,90E-05	1,90E-05	
6	3	2,28E-04	2,28E-04	2,28E-04	2,28E-04
7	3	1,14E-04	1,14E-04	1,14E-04	1,14E-04

Fonte: Próprio autor (2023)

Para a obtenção dos quartis, foi definido dois valores (um inferior e um superior) indicando que se ocorressem esses valores, o especialista ficaria “surpreso”. Estes valores seriam equivalentes aos quartis 10% e 90%. Em seguida, seria requisitado a definição de outros dois valores (um inferior e um superior) indicando que se ocorressem esses valores, o especialista ficaria “perplexo”.

Estes valores seriam considerados os quartis 99% e 1%. Outra vez, assim como no primeiro método desta categoria, várias informações específicas da área da probabilidade são necessárias para o ajuste das informações do especialista para a curva de uma distribuição de probabilidade. Então, o valor mediano das taxas de falha dessa tabela foi levantado, e esse foi considerado como a taxa de falha daquele modo.

O que justifica essas adoções é que se utilize os conhecimentos de alguns dos modelos teóricos e poucas informações do especialista para encontrar a distribuição que melhor modela o comportamento da variável de interesse. Tal processo foi repetido para todos os modos de falha levantados, e os resultados estão dispostos na tabela 5.

Tabela 5- Taxas de Falha da Bomba Centrífuga.

Taxa de Falha (Edução) do Componente		
1,14E-04		
ID	Modo de Falha	Taxa de Falha (Edução) Modo de Falha
1	Superaquecimento / Emperragem	0,00E+00
2	Danos nos mancais	1,90E-05
3	Vibração / ruído	1,90E-05
4	Vazamento	1,90E-05
5	Defeito elétrico	1,90E-05
6	Perda de escorva após a partida	0,00E+00
7	Pressão alcançada insuficiente	1,90E-05
8	Capacidade fornecida insuficiente	0,00E+00
9	Não fornecimento de líquido	1,90E-05

Fonte: Próprio autor (2023)

A partir da educação e análise resultante da taxa de falha da bomba foi encontrada o valor de $1,14E-04$ diante das taxas de falhas por modo de falha dispostos na FMEA. Esse valor foi muito diferente dos valores encontrados no OREDA (2015, vol 2, p. 130) que destaca uma taxa de falha para bomba centrífuga de $106,84E+06$ como valor padrão para um tempo de Operação de 51377 horas em uma amostra de 143 ativos e 389 falhas ocorridas. Ou seja, esse valor é $9,37E+12$ menor do que o disposto no repositório disponível, mas este fator é justificado pelo OREDA adotar taxas de falhas constantes como premissa e por não ser representativo para operação de fluxo contínuo como é a estratégia desse laboratório de testes. Importante lembrar que a coleta de dados de confiabilidade de falha e manutenção abrangeu dados relativos a todos os equipamentos instalados dentro dos limites descritos na por API 17A/2022 e de acordo com os requisitos da ISO 14224/2006. Com base nos resultados, foi possível concluir que a partir de uma proposta de educação com desenvolvimento anterior da árvore de ativos e sua criticidade foi identificado que os modos de falha de danos nos mancais, vibração/ruído, vazamento, defeito elétrico, pressão alcançada insuficiente e não fornecimento de líquido representam os modos mais críticos da bomba utilizando a expertise dos especialistas do projeto.

A elaboração de uma rotina de manutenção e um prognóstico/diagnóstico a partir dos dados sensorialmente coletados e modelados via *Machine Learning* após operação se faz

necessária para tomadas de decisão de acordo a saúde do ativo, evitando, assim, acidentes catastróficos, perdas produtivas e aumento de custos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Essa pesquisa apresenta um método para estruturar a aquisição de opinião de especialistas no contexto de escassez histórica de camadas de falhas no ambiente *offshore*. O método *Delphi* de educação para entrevistar especialistas em ambientes de testes mostrou ser adequado e mais sintetizado para a estimativa de confiabilidade da bomba centrífuga do e aplicada para outros componentes do laboratório de qualificação e confiabilidade, LDP.

Na seleção dos artigos para a análise foi possível visualizar um grande número de pesquisas que não descrevem detalhadamente a realização do método, o que prejudica a interpretação dos leitores e gera uma oportunidade. Com relação a utilização do método nas pesquisas das áreas da engenharia foi possível visualizar que ele é utilizado para objetivos de pesquisa variados, como na identificação e priorização de fatores, riscos, barreiras, entre outras variáveis que se apresentaram nas pesquisas.

Não foi encontrada na literatura uma forma menos dispendiosa nas discussões entre os especialistas e, para melhorar a proposição do método de educação, foi construída uma árvore de ativos e feito sua análise da criticidade para assim otimizar os formulários FMEA que serão construídos, sendo posteriormente levantados seus modos de falhas mais críticos, apenas, em detrimento dos repositórios encontrados na literatura. Uma desvantagem do método proposto é a falta de aplicações matemáticas e estatísticas, que não podem ser aprofundadas por falta de dados empíricos, seja de sistemas similares ou de testes de vida acelerados ou em um cenário relevante.

Ao analisar as pesquisas levantadas para o estudo sobre o método *Delphi*, verifica-se que os autores convergem na definição de parâmetros e critérios que serão utilizados no decorrer da execução da pesquisa. Essa abordagem introduz a integração de informações subjetivas geradas por especialistas durante o processo de desenvolvimento, com o objetivo de fornecer *insights* a partir dela para fornecer à equipe de desenvolvimento uma base para a tomada de decisões, principalmente em termos de revisão de projeto e adequação aos requisitos estabelecidos com os clientes.

Contudo, pode ser visto que o método produz previsões de confiabilidade imprecisas o que fornece uma fragilidade no método. Esse desafio, que pode impactar a validade e a fidelidade dos dados em relação a outros bancos de dados de falhas mencionados anteriormente, estabelece uma linha de base crucial para iniciar a análise de confiabilidade nos estágios iniciais de um projeto com potencial inovador. Esse método servirá para identificar falhas de projeto nos estágios iniciais de desenvolvimento, pois elimina ou

minimiza os padrões de defeitos potenciais identificados, ajuda a incorporar ações ao projeto, aumenta a manutenibilidade e a disponibilidade dos ativos da área petrolífera.

Com isso para adoção de uma etapa inicial para um ambiente controlado, como um laboratório de qualificação e confiabilidade, à medida que o projeto se desenvolver, novas análises de confiabilidade podem e devem ser realizadas com dados reais, visando garantir a qualidade e a maturidade tecnológica do projeto final.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

O método de educação de especialistas proposto tem restrição de gerar dados reais do equipamento nas empresas, porém, com a operação dos ativos e com a adoção de métodos de inteligência artificial (ex.: Prognóstico de falhas por machine learning, data driven ou preditiva inteligente), essa restrição pode ser minimizada. Objetiva-se posteriormente em outra pesquisa, a coleta de dados reais e a análise exploratória dos dados do LDP que poderiam ser utilizados como entrada do sistema especialista para determinar a confiabilidade, comparar com os dados elicitados e o momento ideal para substituição ou reparo do ativo com o melhor custo-benefício possível para cada situação do projeto, após o pós-operação do laboratório.

Para que isto ocorra, é necessário um processo de análise exploratória dos dados coletados e que estes dados estejam disponíveis para aplicação nestes estudos, sendo que esta condição não foi possível no início do projeto pelo atraso na construção do LDP. Para determinação da precisão dos modelos de PHM (Prognostics Health and Management), do português Prognóstico e Gestão da Saúde de máquinas é diretamente correlata a taxa de aquisição e qualidade de coleta de dados. O registro dos dados coletados durante o monitoramento deve apresentar, no mínimo:

1. Dados do equipamento monitorado;
2. Condições de operação;
3. Posicionamento de coleta dos sensores;

Para os ativos que tenham seu nível de vibração, temperatura ou outra grandeza preditiva monitorado, dados relativos à cinemática dos componentes da máquina, como velocidades de rotação e frequências características dos rolamentos deverão ser previamente especificados. O treinamento dos profissionais que farão o monitoramento da condição dos ativos sensorizados deverá estar de acordo com a norma ISO 18436 -1 o medidor poderá ser utilizado para monitorar o estado de máquinas

rotativas e equipamentos estáticos, detectando possíveis problemas e auxiliando em sua manutenção preventiva e corretiva. (INTERNATIONAL STANDARD, 2021) O tipo de sensor e o posicionamento de cada um deverão ser definidos conforme o tipo de máquina e sua criticidade, mitigações oriundas das análises FMEA ou taxas de falhas onde será instalado e os sistemas de aquisição de dados no campo, utilizando redes de protocolo aberto, poderão ser utilizados para concentração dos sinais dos detectores.

Para o desenvolvimento de uma PHM para o laboratório será considerado como premissa futura:

- Os modelos de Manutenção Preditiva deverão ser considerados para equipamentos críticos com modos de falhas detectáveis pelo sensoriamento implementados;
- A etapa de diagnóstico de falhas do programa de confiabilidade será baseada na norma ISO 13379-11;
- A abordagem de diagnóstico/prognóstico a ser utilizada será a Data-Driven para a previsão do Tempo de Vida Remanescente (RUL);
- O algoritmo computacional que realizará o diagnóstico de falhas poderá ser escrito em logica fuzzy, Matlab, linguagem Python, R ou outra linguagem opensource;
- O diagnóstico consistirá em duas fases detecção de anomalia e classificação de saúde:

¹ ISO13379-1. Condition monitoring and diagnostics of machines: Data interpretation and diagnostics techniques. Part 1: General guidelines.

2012. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/39836.html>.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Boletim de Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural. Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Rio de Janeiro, 31 de março de 2021.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Dados do desempenho das indústrias do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis e do sistema de abastecimento nacionais no período 2008-2017. **Anuário Estatístico 2018**. 27 de jul. de 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/anuario-estatistico-2018#Se%C3%A7%C3%A3o%202>. Acesso em: 06 de abr. de 2021.
- ANP. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO. Resolução ANP nº 26, de 08 de junho de 2016. **DOU**. 08 de junho de 2016. Disponível em: <https://atosoficiais.com.br/anp/resolucao-n-19-2013?origin=instituicao&q=19/2013>. Acesso em: 06 de abr. de 2021.
- API RP 17A. **Design and Operation of Subsea Production Systems: General Requirements and Recommendations**. 6. Ed. May 2022. Disponível em: https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=API%20RP%2017A&item_s_key=00010483. Acesso em 02/02/2023.
- ARIF, S., KHAN, Q.; GAHYUR, S. Processos de Engenharia de Requisitos, Ferramentas/Tecnologias e Metodologias. **International Journal of Reviews in Computing**, p. 42-56. 2009. Disponível em: https://bdm.unb.br/bitstream/10483/29066/1/2021_LucasDaSilvaSouza_tcc.pdf. Acesso em: 14 de jun. de 2022.
- ASPINALL, WP; COOKE, RM. **Quantifying scientific no from expert judgment elicitation**. In: ROUGIER, J.; SPARKS, S.; HILL, L. (Eds.). Risk and uncertainty assessment for natural hazard. Cambridge, UK: Cambridge University Press. p. 64–99, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14224**: Indústrias de petróleo e gás natural: coleta e intercâmbio de dados de confiabilidade e manutenção para equipamento. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5462: Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro, 1994.
- AYYUB, B. M. **Elicitation of expert opinions for uncertainty and risks**. Boca Raton: CRC Press, 2001.

BARROS FILHO, Adail. Utilização de Ferramentas de Confiabilidade em um Ambiente de Manufatura de Classe Mundial. 2003, 103 f. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. São Luis, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.47749/T/UNICAMP.2003.296876>. Acesso em: 14 de jun. de 2022.

BIROLINI, A. **Reliability Engineering: Theory and Practice**. 8. ed. Springer, 2007

BRESSER-PEREIRA, L.C. **Desenvolvimento e Subdesenvolvimento no Brasil**. São Paulo, Companhia das Letras, 2011.

CORRÊA, G. M.; LUCENA FILHO, G.; FIGUEIREDO, R. M. C. Possibilidades no Campo de Observação para a Elicitação de Requisitos: Uma Reflexão. In: Simpósio Brasileiro de Qualidade de Software, **Anais[...]**, 2012, Fortaleza. Workshop Olhar Sociotécnico sobre a Engenharia de Software, 2012. Disponível em: citou apenas na planilha https://is.cos.ufrj.br/woses/2012/documentos/98456_1.pdf. 21 de jan de 2023.

DALKEY, N. C.; HELMER, O. An experimental application of the *Delphi* method to the use of experts. **Management Science**, v. 9, n. 3, p. 458 - 467, 1963. Disponível em: <https://doi.org/10.1287/mnsc.9.3.458>. Acesso em: 18 de set. de 2022.

DALKEY, N.C. **Experiments in Group Prediction**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1968. Disponível em: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2008/P3820.pdf>. Acesso em: 17 de jul. de 2022.

DALKEY, N.C. **The Delphi Method: An Experimental Study of Group Opinion**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1969. Disponível em: https://www.rand.org/pubs/research_memoranda/RM5888.html. Acesso em: 13 de abr. de 2022.

DALKEY, N.C.; BROWN, B.B.; COCHRAN, S. W. **The Delphi Method, III: Use of Self-Ratings to Improve Group Estimates**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1969. Disponível em: https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/research_memoranda/2006/RM6115.pdf. Acesso em: 21 de mar. de 2022.

DOMÉCH, Jesus Moré. **Aplicação da lógica fuzzy na avaliação da confiabilidade humana nos ensaios não destrutivos por ultrassom**. 184 f, 2004. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.metalmat.ufrj.br/index.php/br/psquisa/producao-academica/teses/2004/77--68/file>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

DROGUETT, E.L.; MOSLEH, A. Bayesian Analysis of Reliability of Products in Development. **Management & Production**, v. 13, n. 1, p. 57-69, Abr. 2006. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/gp/a/MbBjNCGVFXLGCgvfWMYrqJy/?lang=pt&format=pdf>.

Acesso em: 13 de maio de 2022.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). Annual Energy Outlook 2015. Abr. 2015. Disponível em: <https://www.nrc.gov/docs/ML1617/ML16172A121.pdf>. Acesso em: 28 de jan. de 2023.

ERBER, F.S.; **Convenções de Desenvolvimento no Brasil Contemporâneo: Um Ensaio de Economia Política**. Brasília, DF: CEPAL. Escritório no Brasil/IPEA, 2010. (Textos para Discussão CEPAL-IPEA, 13). Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/2967>. Acesso em: 07 de mar. de 2022.

FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Reliability and Industrial Maintenance**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2011.

GALLIANO, AGO. **Scientific method: theory and practice**. São Paulo: Habra, 1979.

GOMIDE, F. A. C.; GUDWIN, R. R. Modelagem, controle, sistemas e lógica fuzzy. **SBA Controle & Automação**, v. 4 n. 03, setembro-outubro. 1994. Disponível em: <https://www.sba.org.br/revista/volumes/v4n3/v4n3a02.pdf>. Acesso em: 11 de maio de 2022.

GUNDA, S. G. **Engenharia de requisitos: Técnicas de elicitação**. University West, Departamento de Tecnologia, Trollhattan, Suécia. 2008.

HÄDER, M., HÄDER, S. Delphi und Kognitionspsychologie: Ein Zugang zur theoretischen Fundierung der Delphi-Methode. **Journal ZUMA-Nachrichten**, v. 19, n. 37, p. 8-34, 1995. Disponível em: <https://www.ssoar.info/ssoar/handle/document/20888>. Acesso em: 21 de mar. de 2022.

HALLBERT, B. et. al. The use of empirical data sources in HRA. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 83, no. 2, p. 139-143, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832003002011>. acesso em: 22 de mar. de 2022.

HELMANN, K. S. **Uma sistemática para determinação da criticidade de equipamentos em processos industriais baseada na abordagem multicritério**. 2008. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2008. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3611>. Acesso em: 22 de mar. de 2022.

HELMER-HIRSCHBERG, O. **Analysis of the Future: The Delphi Method**. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 1967. Disponível em: <https://www.rand.org/pubs/papers/P3558.html>. Acesso em: 21 de mar. de 2022.

- INTERNATIONAL STANDARD. ISO 18436-1: condition monitoring and diagnostics of machines systems: requirements for certification of personnel. 3. Ed. 2021. Disponível em: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/67515/2ff9f56b0bb0418198b1fd577d56f9e2/ISO-18436-1-2021.pdf>. Acesso em: 06 de abr. de 2021.
- ISO - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14224 Petroleum, petrochemical and natural gas industries**: collection and exchange of reliability and maintenance data for equipment. Switzerland, Geneva. 2006.
- JAPAN INSTITUTE FOR PLANT MAINTENANCE (JIPM). **600 Forms Manual**. Japan, s.d. Disponível em: <https://chools.in/wp-content/uploads/2020/12/TPM-PDF-1.pdf>. Acesso em: 15 de jun. de 2022.
- JAYNES, E. T. **Probability theory**: The logic of science. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- KENC, Turalay; ERDEM, Fatma; ÜNALMIS, Ibrahim. Resilience of emerging market economies to global financial conditions. **Central Bank Review**, v. 16, n. 1, p. 1-6, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1303070116000032>. Acesso em: 12 de fev. de 2023.
- KNIGHT, C. R. Four decades of reliability progress. **Annual Reliability and Maintainability Symposium**. p. 156-160, 1991 Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/154429>. Acesso em: 18 de nov. de 2022.
- KNOL, A.B. et. al. The use of expert elicitation in environmental health impact assessment: a seven-step procedure. **Environmental Health**. v. 9, n. 19, 2010. Disponível em: <https://ehjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/1476-069X-9-19>. Acesso em: 18 de nov. de 2022.
- KRÜGER, U. M. **Die Antizipation und Verbreitung von Innovationen**: Entwicklung und Anwendung eines kommunikationsstrategischen Konzeptes unter besonderer Berücksichtigung. s. d. Universidade da Califórnia. 1975.
- LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. 3. ed. Rio de Janeiro: QualityMark, 2001. 388 p.
- LEAL, G. L. N.; HADDAD, A. A Fuzzy Logic-Possibilistic Methodology to Analyze the Main Corrosion Damages Mechanisms in Pipes and Equipment Installed in an Oil and Gas Platform. **International Journal of Science and Qualitative Analysis**. v. 5, n. 1, p. 15-23, 2019. Disponível em: <https://www.sciencepublishinggroup.com/journal/paperinfo?journalid=358&doi=10.11648/j.ijjsqa.20190501.13>. Acesso em: 11 de maio de 2022.
- MERRIAM-WEBSTER. **Merriam-Webster's Collegiate Thesaurus**. Merriam-Webster, Incorporated, 2. ed. 2018. 1162 p.

- MENEZES, Mariana Souza. **Modelo de suporte ao planejamento de manutenção para sistema na indústria de petróleo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022. Disponível em <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/45919>. Acesso em: 11 de fev. De 2023.
- MITROFF, I., TUROFF, M. **Philosophical and methodological foundations of Delphi**. In LINSTONE, H. A.; TUROFF, M. *The Delphi method: Techniques and applications* Newark, NJ: New Jersey Institute of Technology, p. 17-34. 2002. Disponível em: http://www foresight.pl/assets/downloads/publications/Turoff_Linstone.pdf. Acesso em: 21 de mar. de 2022.
- MODARRES, M., KAMINSKIY, M.P., KRIVTSOV, V. **Reliability Engineering and Risk Analysis: A Practical Guide**, 3. ed. CRC Press, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1201/9781315382425>. Acesso em: 18 de out. de 2022.
- MOUBRAY, John. **RCM II: Manutenção Centrada em Confiabilidade**. Edição brasileira. Traduzido por: Kleber Siqueira, Aladon Ltd. Inglaterra, 2000.
- MOURÃO, Y.; SANTANA, J.; LINS, I. Estimativa de Manutenções de Poços Offshore Via Processo de Renovação Generalizado. In: XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUCAO. Anais[...] A Engenharia de Produção e suas contribuições para o desenvolvimento do Brasil. Maceió, Alagoas, Brasil, 16 a 19 de outubro de 2018.2018. https://abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_263_512_35953.pdf. Acesso em: 12/12/2022. Acesso em: 11 de maio de 2022.
- MULLER, L. Proposição de metodologia baseada em confiabilidade para gerenciamento da integridade de poços em produção. Dissertação, São Paulo, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-11012022123542/publico/LuizMullerCorr21.pdf>. Acesso em: 11 de maio de 2022.
- NUNAMAKER, J.; CHEN, M.; PURDIN, T. Systems development in information systems research. **Journal of Management Information Systems**, 7, p. 89-106, 1991. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/07421222.1990.11517898>. Acesso em: 11 de maio de 2022.
- OLAWOYIN, R. Risk and Reliability Evaluation of Gas Connector Systems Using fuzzy theory and Expert Elicitation. **Cogent Engineering**, v. 4, n. 1, 2017. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/23311916.2017.1372731>. Acesso em: 12 de fev. de 2023.
- OREDA. **Offshore and Onshore Reliability Data**. 6. ed. v. 2, Subsea Equipment. 2015. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/467317717/OREDA2015-offshore-and-Onshore-Reliability-Data-6th-Edition-Vol-2-Subsea-Equipment-pdf#>. Acesso em 02 de fev. de 2023.
- PAETSCH, F., EBERLEIN, A., e MAURER, F. Engenharia de Requisitos e Desenvolvimento Ágil de Software. *Enabling Technologies*, IEEE, p. 308-313. 2003. Disponível em:

[https://www.scirp.org/\(S\(czeh2tfqw2orz553k1w0r45\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1706150](https://www.scirp.org/(S(czeh2tfqw2orz553k1w0r45))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1706150) Acesso em: 18 de out. de 2022.

PALLEROSI, C. A. Redundâncias: por que, quando e como aplicá-las? In: Simpósio Internacional de Confiabilidade. [Anais...]. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18732/1/CT_CEEC_VII_2019_08.pdf 12 de fev. de 2023.

PALLEROSI, C.; MAZZOLINI, B.; MAZZOLINI, L. **Confiabilidade Humana**: conceitos, análises, avaliação e desafios. São Paulo: All Print Editora, 2011.

PEARL, J. **Probabilistic Reasoning in Intelligence Systems**: Networks of Plausible Inference. San Mateo, CA: Morgan Kaufmann, 1988.

PESTANA, M. A. **Elicitação de especialistas em estudos de confiabilidade e análise de risco**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3135/tde-12072017-080326/pt-br.php> citou apenas na planilha 12 de dez. de 2022.

PIAZZA, G. **Introdução à engenharia da confiabilidade**. Caxias do Sul: EDUCS, 2000. 128 p.

PILL, J. **The Delphi method**: Substance, context, a critique and an annotated bibliography. Socio-Economic Planning Sciences, 1971.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. **System reliability theory**: models, statistical methods, and applications. 2 ed. New Jersey: Wiley, 2003.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; TASSINARI, C. C. G. Pré-sal: geologia e exploração. **Revista USP**, [S. l.], n. 95, p. 33-42, 2012. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/revusp/article/view/52236>. Acesso em: 12 de jan. de 2023.

SANTOS, D. J. Análise de riscos e priorização de manutenção em unidades de geração de energia com uma abordagem da lógica fuzzy, 2013. Disponível em: <https://silo.tips/download/analise-de-riscos-e-priorizaao-de-manutenao-em-unidades-de>. Acesso em: 12 de dez. de 2022.

SICSÚ, J.; DE PAULA, L. F.; MICHEL, R.; Por que novo desenvolvimentismo?. **Revista de Economia Política**, v. 27, n. 4, p. 507-524, out-dez, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rep/a/BN4xMxTZCC7VzsRmzgjHXRO/?lang=pt>. Acesso em: 12 de dez. de 2022.

SIGNORINI FILHO, G. A. Estudo Das Métricas De Confiabilidade De Um Módulo De Controle Submarino Aplicado Em Produção De Petróleo No Pré-Sal. 2019. Monografia (Especialização em Engenharia da Confiabilidade) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019. Disponível em:

https://riut.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/18732/1/CT_CEEC_VII_2019_08.pdf. Acesso em: 04 de maio de 2022.

SILVA, A. H. M. Análise de confiabilidade de um sistema de controle de poços submarinos de petróleo. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Fluminense, 2017. Disponível em: <https://portal1.iff.edu.br/pesquisa-e-inovacao/pos-graduacao-stricto-sensu/mestrado-profissional-em-sistemas-aplicados-a-engenharia-e-a-gestao/dissertacoes-defendidas/dissertacoes-defendidas-em-2017/analise-de-confiabilidade-de-um-sistema-de-controle-de-pocos-submarinos-de-petroleoCitou>. Acesso em: 04 de maio de 2022.

SOUSA, Alberto B. **Método Delphi**. 2018. Disponível em: <https://sites.google.com/site/alberto-barrossousa/metodologias-de-educacao/metodo-Delphi>. Acesso em: 22 de set. de 2022.

STRUTT, J.; WELLS, D. API 17N: Recommended Practise for Subsea Production System Reliability. **Technical Risk & Integrity Management**. Maio de 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4043/25412-MS>. Acesso em: 13 de abr. de 2021.

THOM, F. C. M. Modelo de cálculo de risco dinâmico aplicado a compressores de gás. 2018. 299 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

WECHSLER, W. **Delphi-Methode, Gestaltung und Potential für betriebliche Prognoseprozesse**. Schriftenreihe Wirtschaftswissenschaftliche Forschung und Entwicklung. München, 1978.

WOUDENBERG, F. V. An Evaluation of Delphi. *Technological Forecasting and Social Change* 40, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/004016259190002W>. Acesso em: 21 de mar. de 2022.

YOUSUF, M.; ASGER M. Comparison of Various Requirements Elicitation Techniques. **International Journal of Computer Applications**. v. 116, 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/276129123_Comparison_of_Various_Requirements_Elicitation_Techniques Acesso em: 12 de fev. de 2023.

ZHANG, Y.; WILDEMUTH, B. M. **Entrevistas não estruturadas**. p.1-9. 2009. Disponível em: https://www.ischool.utexas.edu/~yanz/Unstructured_inte_rviews.pdf. Acesso em: 20 de fev. de 2023.

ZOWGHI, D.; COULIN, C. Requirements Elicitation: A Survey of Techniques, Approaches, and Tools. Springer, Verlag. p. 19-46. 2005. Disponível em : https://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-28244-0_2 Acesso : 14/04/2022

ANEXO I – RESPOSTAS DOS ESPECIALISTAS NA EDUCAÇÃO PARA OS MODOS DE FALHAS DA BOMBA CENTRIFUGA DO LDP

Especialista	Modo de Falha								
	Superaquecimento / Emperragem	Danos nos mancais	Vibração / ruído	Vazamento	Defeito elétrico	Perda de escorva após a partida	Pressão alcançada insuficiente	Capacidade fornecida insuficiente	Não fornecimento de líquido
1	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)
	10	20	25	25	5	5	5	2	3
2	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)
	10	10	10	15	15	10	10	10	10
3	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Provável (40-60%)	Pouco provável (20-40%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)
	10	10	10	20	10	10	10	10	10
4	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)
	10	10	10	10	10	10	10	10	20
5	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Provável (40-60%)	Provável (40-60%)	Provável (40-60%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Provável (40-60%)
	5	10	15	15	15	5	10	10	15
6	Provável (40-60%)	Pouco provável (20-40%)	Muito provável (60-80%)	Pouco provável (20-40%)	Provável (40-60%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)	Pouco provável (20-40%)	Pouquíssimo provável (0-20%)
	20	10	15	15	10	10	10	5	5
7	Muito provável (60-80%)	Muito provável (60-80%)	Provável (40-60%)	Provável (40-60%)	Provável (40-60%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouquíssimo provável (0-20%)	Pouco provável (20-40%)
	20	15	20	20	10	2	3	5	5

ANEXO II – FMEA - BOMBAS DE ÁGUA ÁREA DE LIQUIDIDOS – LDP (5423)

ITEM/NOME/ FUNÇÃO DO PROJETO/ PROCESSO	MODO DE FALHA POTENC IAL	EFEITO (S) DA FALHA EM POTENCIA L	<u>SEVERI DADE</u>	CAUSA (S) POTENCI AL DA FALHA	<u>OCORR ÊNCIA</u>	CONTR OLE ATUAL DE PREVE NÇÃO	CONT ROLE ATUA L DE DETEC ÇÃO	<u>DETEC ÇÃO</u>	<u>RIS CO (RP N)</u>	AÇÃO PREVENT IVA RECOME NDADA	NOME DO RESPON SÁVEL E PRAZO	AÇÃ O TOM ADA	<u>SEVERI DADE</u>	<u>OCORR ÊNCIA</u>	<u>DETEC ÇÃO</u>	<u>RIS CO (RP N)</u>
BOMBA DE ÁGUA	Vazame nto pelo selo mecânic o	Disturbio no funcionam ento do sistema		Desgaste por atrito					0	Lubrificaç ão constante , limpeza periódica, verificaã o periódica de parâmetro s						0
		Queda de rendimento do equipamen to		Deformaç ão plástica na mola					0	Estudo da constante elástica da mola e cálculo de parâmetro s para utilização apenas de deformaç ões elásticas, verificaã o do desgaste e estudo para a troca antes do colapso						0

				Deslocamento do selo mecânico					0	Verificação do alinhamento com o eixo. Verificação do acoplamento do selo mecânico através de check list.						0
Danificação do acoplamento		Distúrbio do funcionamento do equipamento		Desgaste por atrito					0	Verificação periódica, lubrificação constante e estudo de troca e manutenção programada						0
		Queda de rendimento do equipamento		Afrouxamento das conexões					0	Verificação da remontagem em pós manutenção por check list, uso correto de torque na junção do acoplamento e verificação da possível perda de rosca do acoplamento						0

				Excentricidade					0	Verificação da remontagem do acoplamento, através de check list. Possível teste de run out.							0
	Cavitação	Distúrbio do funcionamento do equipamento		Excesso de altura de recalque					0	Estudo prévio da altura máxima de recalque, trabalhando com coeficientes de segurança aceitáveis. Controle para que não se exceda tais parâmetros durante operação							0
		Queda de rendimento do equipamento		Alta pressão de saída					0	Controle na leitura de pressão, certificando aferição dos medidores regularmente. Leitura feita por mais de um							0

										funcionário.						
		Danos as peças do equipamento		Baixa pressão de entrada					0	Controle na leitura de pressão, certificado aferição dos medidores regularmente. Leitura feita por mais de um funcionário						0
	Corrosão	Distúrbio do funcionamento do equipamento		reação química entre peças e fluido					0	Estudo prévio de reação, possível revestimento de peças ou troca de material das peças. Estudo de possível adição de aditivos no fluido.						0

		Queda de rendimento do equipamento		Presença de alguma reagente não desejável					0	Análise por amostras do fluido de entrada						0
	Defeito elétrico	Distúrbio do funcionamento do equipamento		Sobrepotência do sistema					0	Estudo prévio para uso de sistemas de proteção à sobrecarga elétrica para o equipamento. Uso de capacitores de segurança.						0
		Queda de rendimento do equipamento		Erro na conexão					0	Verificação de todas as conexões por meio de check list. Averiguação por mais de um colaborador.						0
		Atrito provocado por afrouxamento de peças internas	Distúrbio do funcionamento do equipamento		Afrouxamento das peças internas por uso					0	Estudo para a substituição ou manutenção periódica das peças. Evitar sobrecarga					

										a do equipamento.						
	Queda de rendimento do equipamento			Pressão acima do limite desejável					0	Controle da pressão, verificado por mais de um colaborador. Verificação para a não sobrecarga durante operação						0
				Excesso de vazão na entrada					0	Controle da vazão, verificado por mais de um colaborador. Verificação para a não sobrecarga durante operação						0
Falha de lubrificação	Distúrbio do funcionamento do equipamento			Má formação do filme por deformidade em peças					0	Inspeção por teste de som e visual. Lubrificação constante						0
	Queda de rendimento do equipamento			Falta de lubrificante					0	Adição constante de lubrificação. Estudo de necessidade de uso						0

										de aditivos							
Falha de rolament o	risco de queda da bomba		Má instalaçã o pós manutenç ão						0	Verificaçã o por check list, acompan hado por supervisã o. Verificaçã o por mais de um colaborad or.						0	
			Afrouxam ento por uso						0	Estudo de substituiç ão e manutenç ão periódica.							0
Falha de ajuste (pressão ou vazão)	Distúrbio do funcionam ento do equipamen to		Falha na leitura de pressão ou vazão						0	Verificaçã o da leitura por mais de um colaborad or.							0
	Desligame nto da bomba e possível acionamen to de bomba secundária de menor pressão		Falha no equipame nto de medição de pressão ou de vazão						0	Aferição periódica dos equipame ntos de medição.							0
	risco de queda		Falha em válvulas internas de controle						0	Estudo de substituiç ão e manutenç ão periódica							0
	risco de rompiment o de vedações e conexões		Falha em válvulas internas de controle						0	Estudo de substituiç ão e manutenç ão periódica							0

TUBULAÇÃO (BOMBA)	Folgas de conexões	Distúrbio do funcionamento do equipamento	Desgaste por uso						0	Manutenção periódica, inspeção visual regularmente, troca em período determinado						0	
		Comprometimento na reposição ao sistema	Falha na remontagem						0	Monitoramento da montagem, inspeção por check list, teste de estanqueidade							0
			Dilatação térmica						0	Revestimento de tubulação com isolante térmico, controle da temperatura de saída do trocador de calor							0
	Desgastes nas borrachas de vedação	Distúrbio do funcionamento do equipamento	Desgaste por uso						0	Inspeção conforme manual do fabricante, troca periódica, testes em amostras							0
		Comprometimento na reposição ao sistema	Falha na remontagem						0	Monitoramento da montagem, inspeção por check list							0

		Distúrbio do funcionamento do equipamento		Fadiga térmica					0	Controle da temperatura de saída do trocador de calor, uso de revestimento com isolamento térmico						0
	Danos na tubulação	Comprometimento na reposição ao sistema		Amassados ou arranhões					0	Pintura adequada e refeita periodicamente, revestimento da tubulação						0
				Peso do fluido de trabalho					0	Uso de abraçadeira a cada metro, controle da vazão de saída do trocador de calor, apoio correto da tubulação						0
VÁLVULAS (BOMBA)	Travamento de haste	Impossibilidade de executar manutenção		Travamento mecânico					0	Estudo do material usada, da superfície da peça, tratamento na superfície, lubrificação constante						0

		risco de acidente pessoal		Deposição de resíduos em alguma parte de estreitamento					0	Limpeza periódica, controle da filtragem do fluido de trabalho						0
	Deteriorização da sede ou da contra sede	Impossibilidade de executar manutenção		Desgaste por uso					0	Limpeza periódica, manutenção periódica, troca periódica						0
		risco de acidente pessoal		Travamento mecânico					0	Estudo do material usado e da superfície da peça, tratamento na superfície, lubrificação constante						0
				Deposição de resíduos						0	Limpeza periódica, controle da filtragem do fluido de trabalho					
		Falha no fechamento	Impossibilidade de executar manutenção		Deformação da peça					0	Estudo prévio do material a ser usado, verificação e limpeza periódica, filtragem do fluido de trabalho					

				Excesso de pressão ou de vazão no fluido a ser filtrado					0	Controle de pressão e vazão na saída do trocador de calor, verificação por mais de um colaborador						0
	Desgaste nas borrachas de vedação	risco de contaminação do fluido com resíduos		Desgaste por uso					0	Manutenção periódica, troca periódica, teste de estanqueidade						0
			Falha na remontagem						0	Supervisão na remontagem, verificação por mais de um colaborador, testes prévios						0
	Excesso de impureza no elemento filtrante	Comprometimento da lubrificação do sistema		Falta de limpeza no elemento filtrante					0	Limpeza periódica, manutenção periódica, troca periódica						0

				Fluído a ser filtrado com muita impureza					0	Verificação completa no equipamento anterior, uso de uma sequencia de filtros com micras decrescentes, verificação da limpeza dos elementos filtrantes							0
--	--	--	--	---	--	--	--	--	----------	---	--	--	--	--	--	--	----------