



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARIA EDUARDA FREIRE DE ARAÚJO

**MODELO MULTICRITÉRIO COM BASE EM MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA
PRIORIZAÇÃO DE COMPONENTES NUM SISTEMA COMPLEXO DA CADEIA DO
PETRÓLEO**

Recife

2024

MARIA EDUARDA FREIRE DE ARAÚJO

**MODELO MULTICRITÉRIO COM BASE EM MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA
PRIORIZAÇÃO DE COMPONENTES NUM SISTEMA COMPLEXO DA CADEIA DO
PETRÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Produção.

Orientador(a): Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínia Cavalcante

Recife
2024

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE**

Araujo, Maria Eduarda Freire de.

Modelo multicritério com base em medidas de importância para priorização de componentes num sistema complexo da cadeia do petróleo / Maria Eduarda Freire de Araujo. - Recife, 2024.

64 p. : il., tab.

Orientador(a): Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Produção - Bacharelado, 2024.

Inclui referências.

1. Manutenção. 2. Método de apoio à decisão multicritério. 3. Medidas de importância. 4. Sistemas complexos. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

MARIA EDUARDA FREIRE DE ARAÚJO

**MODELO MULTICRITÉRIO COM BASE EM MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA PARA
PRIORIZAÇÃO DE COMPONENTES NUM SISTEMA COMPLEXO DA CADEIA DO
PETRÓLEO**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia de Produção.

Aprovado em: 19/09/2024.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alexandre Ramalho Alberti (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Mateus Marques de Santana (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pelo dom da vida, por me guiar, capacitar e fortalecer, especialmente nos momentos mais desafiadores.

Aos meus pais, Ana Paula e Salatiel, por todo apoio na minha formação e por sempre me priorizarem nas suas vidas. À minha tia Lia, por ser minha segunda mãe e me apoiar emocionalmente desde o meu primeiro dia. Agradeço também ao meu filho canino, Luke, por ser sempre o primeiro a me fazer sorrir todos os dias e me levar para ver o sol às 6 horas da manhã, renovando minhas forças. Obrigada por estarem ao meu lado durante minha trajetória, não seria possível chegar até aqui sem vocês.

Às minhas amigas da época de escola, em especial Beatriz, Mickaela, Lorena e Gabriela, por permanecerem presentes e ao meu lado até hoje. Aos grandes amigos que fiz durante a graduação Bruna, Cinthia, Everton, Gustavo, Larissa, Luísa e Mariana pelo constante apoio dentro e fora da faculdade, vocês foram essenciais para minha superação acadêmica e tornaram essa caminhada muito mais leve e especial. Obrigada por sempre me incentivarem a seguir meus sonhos, a ser uma pessoa melhor e mais feliz.

Agradeço ao corpo docente do Departamento de Engenharia de Produção, em especial meu professor orientador Prof. Dr. Cristiano Cavalcante, todos foram fundamentais para meu desenvolvimento acadêmico e profissional. Meus mais sinceros agradecimentos a todos do programa PRH-ANP 38.1 que proporcionaram ainda mais conhecimento e crescimento durante o período de iniciação científica. À ANP por fomentar a pesquisa e a ciência na indústria do petróleo, gás natural e biocombustíveis.

Gostaria de expressar minha gratidão às artistas que me inspiraram ao longo dos anos. Em especial, Katy, Avril e Taylor, cuja arte é fonte de conforto e acolhimento.

Por fim, agradeço a mim mesma, por nunca desistir, por acreditar e persistir, mesmo quando os desafios pareciam insuperáveis. Obrigada por ser forte, corajosa e não medir esforços para escrever sua própria história. Lembre-se que, na jornada da vida, não damos passos para trás, apenas mudamos de direção. Continue fiel aos seus valores e princípios, e sempre se encontrará no caminho certo.

RESUMO

O crescimento contínuo das operações na cadeia de petróleo e a complexidade dos sistemas exigem uma abordagem aprimorada para a gestão da manutenção, especialmente em um cenário de alta competitividade e pressões econômicas, principalmente no *offshore*. É necessário encontrar maneiras eficientes de performar manutenção nos ativos físicos. Nesse sentido, o trabalho objetiva apoiar o plano de manutenção de um sistema complexo por meio da identificação e priorização dos componentes críticos para a alocação de recursos e ações preventivas. Para tanto, as medidas de importância foram utilizadas para determinar quantitativamente a criticidade dos componentes do sistema de um *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) em termos de confiabilidade, disponibilidade, custo e risco. A fim de estabelecer a ordenação dos elementos do sistema com base em todos os critérios, foi realizada a integração das medidas de importância no método de decisão multicritério FITradeoff. A partir disso, foi possível aplicar o modelo desenvolvido em dois cenários com decisores distintos e analisar a contribuição para o plano de manutenção do sistema. Os resultados indicaram que a ordenação dos componentes, trocadores de calor e processador químico térmico, varia a depender das preferências do decisor e que está de acordo com a melhoria esperada para o sistema. Conclui-se que a utilização de medidas de importância é útil para a gestão estratégica da manutenção em sistemas complexos, oferecendo uma base sólida para apoiar o plano de manutenção do sistema.

Palavras-chave: manutenção; método de apoio à decisão multicritério; medidas de importância; sistemas complexos.

ABSTRACT

The continuous growth of operations in the oil chain and the complexity of the systems demand an enhanced approach to maintenance management, especially in a highly competitive and economically pressured environment, particularly offshore. It is necessary to find efficient ways to perform maintenance on physical assets. In this regard, the work aims to support the maintenance plan of a complex system by identifying and prioritizing critical components for resource allocation and preventive actions. To achieve this, importance measures were used to quantitatively determine the criticality of the components of a *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO) system in terms of reliability, availability, cost, and risk. To establish the ranking of system elements based on all criteria, the integration of importance measures was performed using the FITradeoff multi-criteria decision method. This allowed the developed model to be applied in two scenarios with different decision-makers and analyze the contribution to the system's maintenance plan. The results indicated that the ranking of components, such as heat exchangers and thermal chemical processors, varies depending on the decision-maker's preferences and aligns with the expected improvement for the system. It is concluded that the use of importance measures is useful for the strategic management of maintenance in complex systems, providing a solid basis to support the system's maintenance plan.

Keywords: maintenance; multi-criteria decision making; importance measures; complex systems.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Períodos da Manutenção	20
Figura 2: Sistema de processamento de petróleo bruto do FPSO	41
Figura 3: Dados de confiabilidade e política de manutenção do sistema	42
Figura 4: Política de Manutenção Preventiva do sistema.....	43
Figura 5: Subsistema de componentes com política de manutenção preventiva.....	43
Figura 6: Framework do modelo de decisão multicritério proposto	49
Figura 7: Página Inicial do FITradeoff	50
Figura 8: Tela de escolha do tipo de problema	52
Figura 9: Importar dados do problema de uma planilha ou registrar manualmente ..	53
Figura 10: Declaração de função linear na avaliação intracritério	53
Figura 11: Processo de ordenação de pesos pela Avaliação Global	54
Figura 12: Análise de Sensibilidade no FITradeoff.....	56
Figura 13: Ordenação das alternativas – Cenário 1	57
Figura 14: Ordenação das alternativas – Cenário 2	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Parâmetros de confiabilidade e medidas de importância	46
Tabela 2: Matriz de Consequência de um problema de decisão multicritério	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BPs	Bombas De Reforço
CIF	Fator De Importância Crítica
FCC	Craqueamento Catalítico Fluido
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HE	Trocador de Calor
FPSO	Floating Production Storage and Offloading
MCDA	Multi-Criteria Decision Analysis
NBR	Norma Brasileira
ONU	Organização das Nações Unidas
O&G	Óleo e gás
PHs	Pré-aquecedores
RAW	Risk Achievement Worth
RI	Importância de confiabilidade
RRW	Risk Reduction Worth
SI	Importância estrutural
SMS	Spread Mooring System
SWC	Resfriador de água do mar
TCP	Processador químico
WPSF	Sistema de processamento de água do FPSO

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA.....	15
1.2 OBJETIVOS	17
1.3 METODOLOGIA.....	17
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	19
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
2.1 MANUTENÇÃO	20
2.2 MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE ..	22
2.2.1 Medidas de importância de confiabilidade	23
2.2.2 Medidas de importância de disponibilidade	25
2.2.3 Medidas de importância de risco	25
2.2.4 Medidas de importância de custo	26
2.3 MÉTODO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO: FITRADEOFF	28
2.4 SISTEMAS COMPLEXOS NA CADEIA DO PETRÓLEO	29
2.4.1 Produção Offshore.....	30
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	35
4 SISTEMA E APLICAÇÃO NUMÉRICA	40
4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA	40
4.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA	44
4.3 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO	47
4.3.1 Fase Preliminar.....	50
4.3.2 Modelagem De Preferência e Escolha Do Método	52
4.3.3 Finalização	55
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
5 CONCLUSÃO.....	60
5.1 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	61
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

A cadeia produtiva do petróleo caracteriza-se por sua alta complexidade e é comumente dividida em três segmentos principais: *Upstream*, que engloba as atividades de exploração e produção; *Midstream*, que se refere ao transporte por dutos; e *Downstream*, relacionado ao refino e processamento final (ECONOMIDES, HILL & EHLIG-ECONOMIDES, 1994). A exploração e produção de petróleo podem ocorrer tanto em terra (*onshore*) quanto no mar (*offshore*), e ambos os ambientes envolvem sistemas complexos compostos por múltiplos subsistemas que apresentam altos níveis de complexidade e desafios significativos, especialmente na produção offshore.

O conceito de complexidade de sistemas refere-se ao grande número de componentes envolvidos, à diversidade de recursos, à quantidade de operações internas e à interdependência entre esses elementos, aspectos fundamentais discutidos por Kelly (2006) no contexto da engenharia de manutenção e gestão de ativos. A produção em sistemas complexos, como os da indústria de petróleo, possui uma dinâmica diferenciada e mais desafiadora quando comparada com processos de produção mais simples.

Segundo Nicolai e Dekker (2008), a manutenção de sistemas tornou-se ainda mais desafiadora nas últimas décadas, devido, em grande parte, à interação entre os múltiplos componentes desses sistemas. Assim, compreender as relações estabelecidas no ambiente de operação é fundamental para desenvolver um plano de manutenção eficaz, capaz de manter o sistema operante. As medidas de importância são ferramentas cruciais para identificar e priorizar os elementos mais críticos dentro do sistema, oferecendo uma estratégia eficaz para garantir a confiabilidade operacional.

A aplicação das medidas de importância no contexto da manutenção de sistemas multicomponentes é amplamente reconhecida. Essas medidas, que podem incluir índices de risco, confiabilidade, disponibilidade e custos associados aos componentes, permitem a identificação e a priorização dos componentes mais críticos para a operação, a confiabilidade e o desempenho do sistema como um todo. Essa abordagem baseada em dados fornece um embasamento sólido para a tomada de

decisões de manutenção, minimizando riscos, reduzindo custos e melhorando a eficiência operacional. Estudos como os de Ayyub (2001) e Wang *et al.* (2009) destacam a importância dessas medidas na avaliação dos componentes, permitindo uma gestão da manutenção mais estratégica e precisa, especialmente em sistemas complexos multicomponentes.

Este trabalho apresenta os conceitos de manutenção, descreve as medidas de importância e analisa sistemas complexos da cadeia produtiva de petróleo. Além disso, foi avaliada a aplicação dessas medidas para apoiar o plano de manutenção de um sistema de produção de petróleo em um FPSO.

Assim, este estudo foi motivado pela necessidade de analisar o uso das medidas de importância como meio de priorizar ações de manutenção preventiva em componentes de um sistema complexo, com base em critérios de confiabilidade, risco, disponibilidade e custo.

1.1 JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Define-se ativo como algo valioso para uma empresa e seus *stakeholders*. A indisponibilidade de um ativo representa perdas e danos para uma organização. Por esse motivo, a manutenção dos ativos da cadeia do petróleo é uma importante função estratégica e é responsável por atividades de monitoramento, prevenção, diagnóstico, reparação de equipamentos, sistemas e instalações. Se esses elementos não estiverem em estado adequado para uso, haverá a redução na capacidade de cumprirem suas funções.

Sabe-se que a manutenção tem como missão garantir a disponibilidade da função dos equipamentos e instalações visando atender a um processo de produção e, como consequência, corrobora-se para preservação do meio ambiente, com confiabilidade, segurança e custos adequados. Falhas inesperadas em equipamentos são prejudiciais para a produtividade, para a segurança e podem levar a paradas de produção não programadas.

Nesse sentido, em diversos relatórios de investigação de acidentes em instalações petrolíferas, como o Relatório Piper Alpha (CULLEN, 1990) e os *Offshore Safety Case Reports* da *Health and Safety Executive* (HSE, 2015), a manutenção foi

citada como um dos fatores integrantes da cadeia de eventos do ocorrido. Esses documentos ressaltam que falhas na manutenção de equipamentos críticos e na gestão de procedimentos operacionais são frequentemente fatores contribuintes em incidentes, destacando a importância de práticas rigorosas de manutenção para minimizar riscos e garantir a confiabilidade operacional das instalações.

Em 2001, ocorreu um dos maiores acidentes petrolíferos do Brasil, quando a plataforma *offshore* P-36 (a maior do mundo na época) sofreu explosões e naufragou. A P-36 operava na Bacia dos Campos e, segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) do Brasil, o acidente foi causado por "não-conformidades quanto a procedimentos operacionais, de manutenção e de projeto". Conforme evidenciado pelo estudo de Jordão e Franco (2002), há fatores potenciais relacionados à manutenção inadequada que podem causar os episódios relatados anteriormente na indústria de petróleo e gás. Já no cenário internacional, o acidente de Bhopal, talvez seja uma das grandes referências do potencial de danos causado por uma política de manutenção sem base científica e que fatalmente leva a acidentes catastróficos.

Em muitos sistemas complexos com vários componentes, a manutenção preventiva é essencial para garantir a confiabilidade e o desempenho contínuo. No entanto, a implementação de políticas de manutenção preventiva tradicionais pode ser dispendiosa e ineficiente (MARSARO & CAVALCANTE, 2017). Percebe-se a necessidade de se beneficiar de diferentes ferramentas para apoiar o plano de manutenção em sistemas da indústria do petróleo. As medidas de importância ajudam a identificar quais componentes têm maior probabilidade de falhar e qual o impacto dessas falhas na operação do sistema (ZHENG, PAIVA & GURCIULLO, 2020).

A manutenção nessa indústria é desafiadora devido ao ambiente dinâmico, complexo e composto por vários fatores influenciando diretamente as decisões a serem tomadas. Uma parada não planejada de um sistema na cadeia do petróleo gera impactos negativos no viés financeiro e produtivo. Além disso, uma possível consequência de falha nesse ambiente são acidentes catastróficos.

Portanto, esse trabalho busca contribuir para o campo de estudo da manutenção preventiva em sistemas produtivos de petróleo e gás por meio da aplicação de medidas de importância como suporte para a tomada de decisão sobre o plano de manutenção.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar e aplicar as principais medidas de importância para apoiar a tomada de decisão na manutenção preventiva em um sistema de produção de petróleo *offshore*, integrando-as a um modelo de decisão multicritério, visando priorizar componentes críticos com base em critérios de confiabilidade, disponibilidade, risco e custo.

Quanto aos objetivos específicos, temos:

- Levantamento do estado da arte no que tange ao uso de medidas de importância para priorização em sistemas multicomponentes;
- Definição das medidas de importância mais relevantes para avaliar a criticidade dos componentes no contexto da cadeia do petróleo, considerando fatores como confiabilidade, disponibilidade, risco e impacto financeiro;
- Compreensão das características específicas de sistemas multicomponentes da cadeia do petróleo, com o foco em sistemas de produção *offshore*;
- Descrição de um subsistema multicomponente adequado para a aplicação das medidas de importância;
- Dissertar sobre como a aplicação das medidas de importância no sistema selecionado pode apoiar o seu plano de manutenção;
- Integrar as medidas de importância a um modelo de decisão multicritério e realizar simulações de sua aplicação.

1.3 METODOLOGIA

Uma das etapas desse trabalho consistiu no levantamento bibliográfico acerca de manutenção em sistemas complexos na cadeia do petróleo. O objetivo principal dessa atividade foi identificar um sistema para ser utilizado na aplicação prática da pesquisa. Durante esse processo, foi possível compreender características de sistemas complexos principalmente em dois ambientes: refinaria e instalação de produção *offshore*. A partir disso, o contexto de produção *offshore* foi selecionado para a aplicação prática devido a maior disponibilidade de dados na literatura, viabilizando o objetivo geral dessa pesquisa.

O método científico mais adequado para o estudo proposto é o dedutivo. Isso se deve ao fato de que a pesquisa se fundamenta em leis e teorias universais, a partir das quais são derivadas consequências que são então utilizadas para formular explicações e previsões. Assim, o processo segue uma abordagem que vai do conhecimento geral para o específico (MARCONI & LAKATOS, 2003).

Quanto à finalidade, a pesquisa é aplicada, pois utiliza conceitos teóricos e metodologias já existentes para resolver um problema prático e específico na indústria do petróleo (GIL, 2002). Nesse caso, o problema é a melhoria do plano de manutenção em um sistema multicomponente da cadeia do petróleo. A partir disso, o interesse não reside em adquirir conhecimento teórico pelo seu próprio valor, mas sim em utilizar esse conhecimento em um contexto real da indústria.

Essa pesquisa adota uma abordagem combinada, pois abrange tanto a coleta e análise de dados quantitativos relacionados às medidas de importância dos componentes do sistema multicomponente quanto a investigação qualitativa de sistemas complexos da cadeia do petróleo, compreendendo suas nuances e características (CRESWELL & CLARK, 2017). Enquanto a análise quantitativa permitirá a avaliação numérica da importância de cada componente no contexto de manutenção, a abordagem qualitativa enriquecerá a compreensão das implicações práticas.

Quanto ao objetivo, a pesquisa é caracterizada como explicativa, pois as técnicas são utilizadas com a finalidade de apresentar causalidades entre as variáveis, compreendendo os mecanismos subjacentes que levam a determinados resultados (GIL, 2002). As medidas de importância exploradas por nessa pesquisa necessitam de dados que foram obtidos na literatura e, por meio da aplicação, é possível evidenciar relação de causalidade entre variáveis.

Nesta pesquisa se utiliza de técnica de documentação indireta por meio da aquisição de dados por meio de fontes secundárias, como pesquisa bibliográfica, fazendo uso principalmente de artigos e livros. No que tange aos dados da pesquisa, trata-se de uma modelagem, por ser uma representação de uma situação ou realidade construída de forma a auxiliar o tratamento daquela situação de maneira sistemática (CAUCHICK, 2012).

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em cinco capítulos, compreendendo introdução, fundamentação teórica, revisão da literatura, aplicação numérica e conclusão. O capítulo inicial aborda a justificativa e relevância da pesquisa, além de explicitar seus objetivos e a metodologia aplicada. Já o segundo capítulo consiste em uma fundamentação teórica, explorando os conceitos centrais relacionados ao tema em questão, como manutenção, medidas de importância de componentes e sistemas complexos da cadeia do petróleo.

Em sequência, o terceiro capítulo tem o objetivo de elaborar uma revisão da literatura, analisando trabalhos recentes que abordam temas como modelos e políticas de manutenção em sistemas complexos multicomponentes e aplicação de medidas de importância para apoiar a manutenção em diversos setores.

No quarto capítulo, é introduzido o sistema estudado, suas principais características e a aplicação das medidas de importância, descrevendo os resultados encontrados. No último capítulo, serão apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa, explicitando também suas principais limitações e proposições para trabalhos futuros.

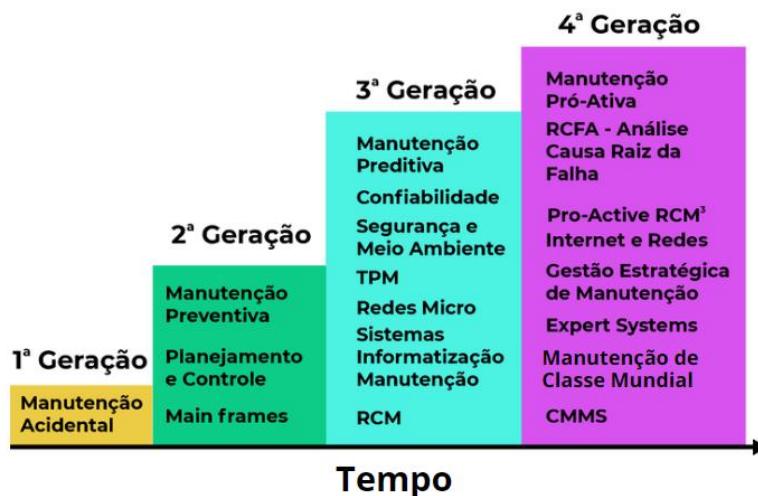
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fundamentação teórica supre, nessa pesquisa, o papel de fornecer ao leitor as bases teóricas e conceituais necessárias para a compreensão do tema abordado no trabalho. Dessa forma, serão apresentados aqui os principais conceitos e definições de manutenção e medidas de importância, além do contexto de sistemas complexos no setor do petróleo.

2.1 MANUTENÇÃO

Ao longo do tempo, observa-se uma evolução nas atividades de manutenção, marcada pela transição de abordagens corretivas para o planejamento sistemático de sistemas, seguido pelo monitoramento baseado em condições, culminando na busca contemporânea por uma abordagem de manutenção inteligente (ZHENG, PAIVA & GURCIULLO, 2020). Observa-se a seguir as quatro gerações da manutenção ao longo do tempo:

Figura 1: Períodos da Manutenção



Fonte: Adaptado de Lemos (2014)

Conforme observado nos períodos da manutenção, a evolução contínua fez com que diversas classificações surgissem. A ABNT, na NBR 5462 (1994, pág.7), classifica os diversos tipos de manutenção e algumas dessas definições são importantes pois são mencionadas durante esse trabalho. Segundo a ABNT:

- a) Manutenção Preventiva: Realizada em intervalos pré-determinados ou de acordo com critérios específicos, tem como finalidade reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item.
- b) Manutenção Acidental ou Corretiva: Efetuada após a ocorrência de uma pane, tem o propósito de restabelecer um item às condições necessárias para desempenhar uma função requerida.
- c) Manutenção Controlada ou Preditiva: Envolve a aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando meios de supervisão central ou amostragem, para assegurar a qualidade de serviço desejada, minimizando a necessidade de manutenção preventiva e corretiva.
- d) Manutenção Programada: Realizada de acordo com um programa preestabelecido, seguindo uma agenda previamente definida.
- e) Manutenção Não-programada: Realizada após a recepção de uma informação relacionada ao estado de um item, seguindo um programa preestabelecido, mas em resposta a uma necessidade imediata.

De acordo com a interpretação do comitê de estudos da Organização das Nações Unidas (ONU), a Manutenção Preventiva é sempre programada, pois visa antecipar-se aos possíveis problemas. Já a Manutenção Corretiva é classificada como não programada quando ocorre uma falha inesperada, caracterizada como uma situação de emergência. Entretanto, a Manutenção Corretiva pode ser considerada planejada quando a decisão é operar um equipamento conhecido por ter um defeito até que ocorra uma falha completa.

Conforme os sistemas tornam-se mais complexos, automatizados e demandam novas tecnologias e métodos, torna-se imperativo o desenvolvimento de modelos e políticas de manutenção mais avançados para gerir eficientemente a manutenção em ambientes complexos.

2.2 MEDIDAS DE IMPORTÂNCIA EM ENGENHARIA DE CONFIABILIDADE

Conforme definido por Aven (2017), engenharia de confiabilidade compreende todas as atividades realizadas para se alcançar a confiabilidade determinada como satisfatória de um sistema. Confidabilidade é a probabilidade de um produto ou serviço exercer sua função sem falhas sob condições de operações especificadas no projeto durante um determinado período estabelecido. (ELSAYED, 1996). Dias (1996) aponta em seus estudos que a confiabilidade é um elemento chave para o sucesso dos ativos no setor comercial, industrial e para o meio ambiente. Pode-se dizer que um sistema confiável demanda menos paradas, intervenções, resulta em menos custos e possui processos mais estáveis e excelentes (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Medidas de importância são amplamente utilizadas para identificar os componentes mais vulneráveis de um sistema e no suporte de atividades de melhoria em engenharia de confiabilidade (DUI, SI & YAM, 2017). Esse conceito foi introduzido por Birnbaum em 1968, onde o autor desenvolveu uma medida de importância de confiabilidade intitulada com o seu próprio nome. A partir desse momento diversas outras medidas de importância de confiabilidade foram desenvolvidas. Embora esse tipo de medida seja o mais amplamente conhecido e disseminado na análise de importância de um item, pode-se também mensurar o impacto de um componente a partir da esfera de disponibilidade, risco e custo para o sistema no qual ele está inserido.

Para Daemi e Ebrahimi (2012), as medidas de importância podem ser classificadas em duas categorias principais: importância estrutural (SI) e importância de confiabilidade (RI). A importância estrutural considera apenas a posição dos componentes no sistema, sem levar em conta sua confiabilidade individual. Por outro lado, a importância de confiabilidade integra tanto a posição dos componentes quanto sua confiabilidade, fornecendo uma visão mais completa do impacto das falhas dos componentes na confiabilidade geral do sistema.

Na visão de Daemi e Ebrahimi (2012), a métrica de Birnbaum é uma das medidas de RI mais conhecidas, que indica a mudança na indisponibilidade do sistema em função da alteração na indisponibilidade de um componente específico. Outra métrica relevante é o fator de importância crítica (CIF), que amplia a métrica de Birnbaum ao incluir a falha dos componentes, atribuindo maior criticidade aos

componentes menos confiáveis. Essas métricas são essenciais para a priorização de componentes em termos de sua substituição ou melhoria para aumentar a confiabilidade do sistema.

O fator de importância diagnóstica (DIF), que representa a fração da indisponibilidade do sistema que envolve a falha de um componente específico, é de extrema importância. Além disso, as métricas de *Risk Achievement Worth* (RAW) e *Risk Reduction Worth* (RRW) são cruciais para entender o aumento na indisponibilidade do sistema quando um componente falha, e a diminuição na indisponibilidade quando um componente nunca falha, respectivamente. Essas métricas são fundamentais para o planejamento de manutenção preventiva e para a melhoria da confiabilidade do sistema.

Portanto, num sistema composto por vários componentes, é fundamental identificar e agir sobre componentes cujo funcionamento é determinante do funcionamento do sistema como um todo. Tal identificação pode ser feita através de medidas quantitativas da importância dos componentes, em função de sua disponibilidade, risco, custo e confiabilidade no momento da análise e de sua posição no sistema.

2.2.1 Medidas de importância de confiabilidade

A mensuração da importância de um componente a partir dos métodos que serão apresentados a seguir baseia-se, em resumo, na observação das confiabilidades do sistema quando o componente está funcionando e quando ele não está. Essas confiabilidades calculadas para o sistema, em conjunto com as confiabilidades individuais dos componentes no momento da análise, são então manipuladas algebraicamente, resultando nas diferentes medidas de importância (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

Duas das principais medidas de importância de confiabilidade são apresentadas a seguir:

- a) Medida de Importância de Birnbaum: quantifica o efeito do i-ésimo componente na probabilidade de falha do sistema. Se I^B é grande, uma pequena mudança na confiabilidade do i-ésimo componente resulta em uma mudança na confiabilidade do sistema no tempo t. Logo, quanto maior I^B , maior a importância do componente i para o sistema.

$$I^B(i|t) = \frac{\partial R_s(r(t))}{\partial R_i(t)} \quad (1)$$

ou

$$I^B(i|t) = R_s(1_i, r(t)) - R_s(0_i, r(t)) \quad (2)$$

Onde: $I^B(t)$ é o índice de Birnbaum do componente i ; $R_s(r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t ; $R_i(t)$ é a confiabilidade do componente i no tempo t ; $R_s(0_i, r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente i está em estado de falha e $R_s(1_i, r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente está funcionando perfeitamente.

- b) Medida de Importância crítica: o significado dessa medida é igual ao de Birnbaum, adiciona-se apenas a incorporação do estado do componente no instante de tempo analisado. Então, essa medida representa a probabilidade condicional de o sistema estar em um estado em que o componente i é crítico e está inoperante em um tempo t , dado que o sistema está inoperante em t .

$$I^{CR}(i|t) = \frac{I^B(i|t)[1 - R_i(t)]}{1 - R_s[r(t)]} \quad (3)$$

Onde: $I^{CR}(t)$ é o índice de Importância Crítica do componente; $I^B(t)$ é o índice de Birnbaum do componente i ; $R_s(r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t ; $R_i(t)$ é a confiabilidade do componente i no tempo t .

É válido ressaltar uma desvantagem apresentada pela medida de Birnbaum, não depende da confiabilidade ou da função acumulada de falha do componente i , nem considera os custos relacionados às falhas. Tal ausência resulta na possibilidade de haver dois componentes com valores iguais para a medida de Birnbaum, mesmo que apresentem níveis de confiabilidade diferentes.

A aplicação de uma determinada medida na análise de sistemas deve ser guiada pela sua adequação às finalidades do estudo. Para contexto de melhoria de sistemas, em que o objetivo é identificar o componente a ser melhorado com vistas a

incrementar a confiabilidade do sistema, recomenda-se o uso de Birnbaum. Já estudos de manutenção, em que o sistema falhou e deseja-se identificar o componente com a maior probabilidade de ser o causador da falha, a Importância crítica é a mais apropriada. (FOGLIATTO & RIBEIRO, 2009).

2.2.2 Medidas de importância de disponibilidade

Segundo Barabady e Kumar (2007), as medidas de importância de disponibilidade podem ser utilizadas para desenvolver uma estratégia para o incremento da disponibilidade, sendo necessário considerar a configuração do sistema. O trabalho desses dois autores explicita que a medida de disponibilidade é função do tempo, das características de falha e de reparado e da estrutura do sistema, podendo ser obtida por meio da equação:

$$I^A(i|t) = \frac{\partial A_s(r(t))}{\partial A_i(t)} \quad (4)$$

ou

$$I^A(i|t) = A_s(1_i, r(t)) - A_s(0_i, r(t)) \quad (5)$$

Onde: $I^A(t)$ é o índice de disponibilidade do componente; $A_s(r(t))$ é a disponibilidade do sistema no tempo t ; $A_i(t)$ é a disponibilidade do componente i no tempo t ; $A_s(0_i, r(t))$ é a disponibilidade do sistema no tempo t dado que o componente i está em estado de falha e $A_s(1_i, r(t))$ é a disponibilidade do sistema no tempo t dado que o componente está funcionando perfeitamente.

2.2.3 Medidas de importância de risco

Assim como a confiabilidade e a disponibilidade, a perspectiva do risco é relevante quando se almeja garantir a integridade e o funcionamento excelente de um sistema. A seguir, define-se duas medidas de importância de risco:

- a) *Risk Achievement Worth* (RAW), ou Valor de Realização do Risco em português, é usado para visualizar a relevância de um evento básico para o risco total do sistema. Um alto valor dessa medida representa um alerta de atenção para o componente em análise, sendo fundamental considerá-lo no

gerenciamento de riscos, gerenciamento de qualidade e atividades de inspeção. Além disso, pode ser relacionado ao impacto da manutenção sobre o item, contabilizando o ganho em restaurar um componente falho (VESELY & DAVIS; 1985).

$$I^{RAW}(i|t) = \frac{1 - R_s(0_i, r(t))}{1 - R_s(r(t))} \quad (6)$$

Onde: $I^{RAW}(t)$ é o índice de risco do componente i ; $R_s(0_i, r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente i está em estado de falha; $R_s(r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t .

- b) *Risk Reduction Worth* (RRW), ou Valor de Redução do Risco em português, tem uma representação oposta ao RAW, o RRW mensura o ganho de um componente em reduzir o nível de risco.

$$I^{RRW}(i|t) = \frac{1 - R_s[r(t)]}{1 - R_s(1_i, r(t))} \quad (7)$$

Onde: $I^{RRW}(t)$ é o índice de risco do componente i ; $R_s(r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t ; $R_s(1_i, r(t))$ é a confiabilidade do sistema no tempo t dado que o componente está funcionando perfeitamente

Assim como comentado na medida de importância de confiabilidade, a adequação do uso de uma das duas medidas apresentadas anteriormente depende do fim que elas estão sendo empregadas. O RRW é apropriado para a finalidade de substituir ou melhorar componentes para aumento da confiabilidade enquanto o RAW é mais indicado para caso de inspeção e manutenção preventiva (DAEMI & EBRAHIMI, 2012).

2.2.4 Medidas de importância de custo

A aplicação de uma política de manutenção adequada para um sistema tem um papel fundamental no gerenciamento dos ativos industriais, objetivando a garantia da disponibilidade dos equipamentos e a segurança de todos os recursos envolvidos. Historicamente, as atividades de manutenção demoraram um período considerável

para serem enxergadas de maneira positiva, visto que antes aplicava-se majoritariamente a manutenção corretiva por acreditar que outras ações representariam uma perda financeira maior. Entretanto, a evolução dos estudos no campo de manutenção evidenciou que essa atividade é uma grande alinhada para redução de custo e perdas.

Atualmente, o setor industrial está inserido num ambiente extremamente competitivo, onde custos operacionais e do sistema, assim como a necessidade de atender requisitos da operação, podem ser fatores decisivos para o sucesso organizacional (GAO, BARABADY & MARKESET, 2010). Dessa forma, medidas de importância de custo buscam mensurar o custo que um componente em dado estado representa para o sistema por um intervalo de tempo. A ideia de um sistema com os intervalos de tempos de falhas muito próximos é um bom direcionador para as melhorias que podem ser estudadas, considerando as todas as possibilidades.

Wu e Coolen (2013) apresentam uma medida de custo denominada Potencial de Melhoria baseado no custo, a qual é uma extensão da medida de confiabilidade Potencial de Melhoria definida anteriormente. A inserção do custo nessa medida resulta na seguinte equação:

$$I^{PMBc}(i|t) = CR_s(1_i, r(t)) - CR_s(r(t)) \quad (8)$$

Onde: $CR_s(1_i, r(t))$ representa o custo de manter o sistema quando a confiabilidade do componente i é aumentada para 1 e a confiabilidade dos demais permanecem a mesma, e $CR_s(r(t))$ significa o custo de manter o sistema com a confiabilidade atual de todos os componentes.

A expressão acima permite mensurar a diferença entre o custo de manter o sistema com um componente k perfeito e o custo de manutenção com o componente k atual. Logo, quanto menor o valor de I^{PMBc} , maior é será a importância do componente segundo o critério de custo.

2.3 MÉTODO DE APOIO À DECISÃO MULTICRITÉRIO: FITRADEOFF

Um problema de decisão multicritério é definido pela presença de, no mínimo, duas opções de ação, com o intuito de alcançar diversos objetivos que frequentemente entram em conflito uns com os outros. Cada um desses objetivos está diretamente associado a uma variável que o caracteriza e que é utilizada para avaliar as alternativas. Essas variáveis são denominadas critérios, atributos ou dimensões. (ALMEIDA, 2011).

O campo de estudo que abrange os métodos de apoio à decisão é conhecido, em língua inglesa, por *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), *Multi-Criteria Decision Aid* (MCDA) ou *Multi-Criteria Decision Analysis* (MCDA). Os diversos métodos que compõe o MCDA têm como princípio estabelecer a estrutura de preferências de um decisor, relacionada às consequências num problema de decisão e conduzir a avaliação das alternativas que estão sendo consideradas no problema de decisão (ALMEIDA, 2013).

O FITradeoff (*Flexible and Interactive Tradeoff*) faz parte dos modelos de agregação aditivo, esse tipo de modelo é classificado como um método de critério único de síntese e sua assume que as consequências de cada alternativa podem ser determinadas com certeza. O modelo aditivo é amplamente empregado como base em diversos métodos, e a principal diferença entre eles reside, de maneira geral, no processo de elicitação de preferências do decisor (ALMEIDA, 2013).

Segundo Almeida (2011), o FITradeoff é um método utilizado para a elicitação de constantes de escala com informações parciais, desenvolvido no contexto da Teoria do Valor Multiatributo (MAVT). Ele preserva a fundamentação axiomática do procedimento tradicional de tradeoff. Na modelagem de preferências desse método, é empregada a estrutura de preferência representada por (P, I), que contempla as relações de preferência estrita, indiferença e ausência de relação de incomparabilidade. O decisor deve ser capaz de comparar todas as suas alternativas e estabelecer uma ordem de preferência, respeitando a propriedade de ordenabilidade. Além disso, há a presença da transitividade nesse método pois, pode-se afirmar que, aPb e bPc implica em aPc.

Quanto à racionalidade do decisor, o método adota a abordagem compensatória, então, se há perda num critério, isso pode ser compensado por um

melhor desempenho em outro. No contexto desse trabalho, um decisor possui uma abordagem compensatória quando é capaz analisar os critérios de um componente, como a confiabilidade, disponibilidade, custo e risco, por meio de uma estrutura de raciocínio que equilibra os benefícios de ter bons desempenhos em determinados critérios, mas não conseguir alcançar esse mesmo status em outros.

2.4 SISTEMAS COMPLEXOS NA CADEIA DO PETRÓLEO

O conceito de complexidade de sistemas refere-se ao grande número de componentes presentes no mesmo, à gama mais variada de recursos, um maior número de operações internas e, também, à dependência estocástica existente entre os estados desses componentes. Somado a isso, Müller-Leonhardt *et al.* (2014) enfatiza que a multiplicidade de relações e interações entre as partes dos sistemas complexos conduzem a diversas formas de operação.

Os sistemas de manutenção da indústria do petróleo são sofisticados em decorrência da grande variedade de componentes e processos presentes nos seus ativos, assim, as políticas de manutenção têm um grande impacto no custo e na segurança operacional. Na cadeia do petróleo, encontram-se grandes conglomerados industriais com múltiplas unidades produtivas atuando de maneira integrada, como por exemplo o setor do refino e a produção offshore.

Os sistemas complexos são uma característica fundamental da moderna indústria de petróleo e gás, especialmente quando se considera a operação de refinarias e unidades flutuantes de produção, armazenamento e descarregamento. Esses sistemas envolvem múltiplos componentes interligados que interagem de maneira não linear, gerando comportamentos emergentes que não são facilmente previsíveis a partir das características individuais de cada componente. A gestão e otimização desses sistemas são cruciais para a eficiência, segurança e sustentabilidade das operações.

Em uma refinaria, a complexidade advém da variedade de processos e equipamentos envolvidos na conversão de petróleo bruto em produtos refinados como gasolina, diesel, querosene e petroquímicos. Cada processo, desde a destilação até o craqueamento catalítico e o hidrotratamento, depende de parâmetros precisos de

temperatura, pressão e composição química. A interação entre esses processos precisa ser cuidadosamente equilibrada para maximizar a eficiência e minimizar os resíduos e emissões. Além disso, a manutenção preventiva e o monitoramento em tempo real são essenciais para detectar e corrigir falhas antes que resultem em paradas não planejadas ou acidentes.

Embora refinarias apresente excelentes exemplos de sistemas complexos devido à sua vasta rede de processos integrados, equipamentos diversos e rigorosas exigências de operação contínua, o sistema selecionado para aplicação do trabalho faz parte de um FPSO. Essa decisão se justifica pela disponibilidade de dados encontrado na literatura e pela natureza igualmente complexa.

2.4.1 Produção Offshore

No início do século 21, Guerra e Teixeira (2001) compartilhou a tendência dos sistemas de produção para águas profundas, como os FPSOs, se tornarem cada vez mais a escolha preferida das empresas de petróleo. Tal preferência justifica-se pela combinação, em uma única unidade operacional, das instalações para produção e o armazenamento temporário de óleo e gás. Além disso, os FPSOs representam uma opção de investimento relativamente baixo, uma vez que são navios petrolíferos adaptados para essa nova função.

Após duas décadas, Stoichevski (2020) corrobora com essa perspectiva ao explorar o mercado e compartilhar que 21 unidades de FPSOs planejadas para iniciar operações em breve no território brasileiro. Estimulado por preços favoráveis do petróleo, o mercado de FPSOs continua a se expandir, impulsionado pela entrada de novos participantes, pela inovação em modelos de negócios, e pela crescente aceitação de que essas unidades podem oferecer uma solução mais econômica em comparação ao desenvolvimento de novas áreas de produção de petróleo.

Conforme Ortiz Neto e Costa (2007), a exploração de petróleo offshore pela Petrobrás representa um marco significativo no desenvolvimento tecnológico e econômico do Brasil. A partir da década de 1960, com a descoberta de grandes reservas de petróleo em águas profundas, a empresa enfrentou o desafio de desenvolver tecnologias adequadas para a exploração dessas reservas, dado que a

maioria das tecnologias disponíveis era voltada para a exploração onshore, predominante em outros países. Ao longo do tempo, a empresa não apenas desenvolveu novas tecnologias, mas também aprimorou e adaptou tecnologias existentes para atender às necessidades específicas de exploração em águas profundas no Brasil.

Na visão de Furtado (2011), o desenvolvimento de tecnologias avançadas para a exploração de petróleo em águas profundas é crucial para a manutenção da produção e a maximização das reservas. As plataformas FPSO, com sua capacidade de processar grandes volumes de petróleo, são fundamentais para essa operação, especialmente nas bacias de Campos, Santos e Espírito Santo. Essas unidades são responsáveis por armazenar e transferir o petróleo produzido para navios aliviadores, garantindo a continuidade da produção e a eficiência do escoamento.

Conforme Rampazzo (2022), um FPSO é uma unidade flutuante projetada para produzir, armazenar e transferir petróleo e gás natural. Essas unidades são essenciais para a exploração offshore em áreas remotas e de grande profundidade, onde a infraestrutura terrestre é inviável. O FPSO combina capacidades de produção e armazenamento, permitindo que o petróleo e o gás sejam processados e estocados a bordo até que possam ser transferidos para navios aliviadores ou oleodutos.

De acordo com Furtado (2011), o processo de exploração e produção em águas profundas envolve várias etapas complexas, desde a chegada do petróleo na unidade flutuante até sua separação em óleo, gás e água. A separação eficiente desses componentes é essencial para atender aos rigorosos padrões de qualidade exigidos pelo mercado. As plataformas FPSO utilizam tecnologias avançadas para realizar esse processo, garantindo a pureza do óleo e a segurança das operações.

Furtado (2011) afirma que o tratamento do gás produzido é uma parte integral do processo de produção de petróleo. O gás é desumidificado, comprimido e preparado para exportação para plataformas de re-bombeio. Esse processo é fundamental para a maximização do uso dos recursos extraídos e para a minimização dos impactos ambientais associados à produção de petróleo e gás.

A gestão da água produzida durante a extração de petróleo é outro aspecto crítico do processo. A água é tratada e descartada de forma segura no mar, seguindo rigorosos padrões ambientais. Além disso, a água de injeção, utilizada para manter a pressão nos reservatórios e garantir a continuidade da produção, também passa por

um tratamento cuidadoso para evitar a contaminação e preservar a integridade dos reservatórios (FURTADO, 2011).

E no contexto da produção offshore, a plataforma FPSO se destaca como a principal ferramenta de sua produção. Conforme o Programa de Descomissionamento de Instalações (2020), o FPSO é uma unidade flutuante utilizada na produção, armazenamento e transferência de petróleo e gás natural no mar. Esta estrutura complexa e altamente eficiente desempenha um papel crucial na indústria offshore, especialmente em áreas remotas e de difícil acesso onde a construção de oleodutos é inviável.

No entanto, Rampazzo (2022) destaca que a estrutura física de um FPSO é robusta, projetada para suportar condições ambientais adversas. A unidade geralmente consiste em um casco de navio convertido ou construído especialmente para esta finalidade, equipado com todos os sistemas necessários para extração, processamento e armazenamento de petróleo e gás. O casco oferece grande capacidade de armazenamento, essencial para operações em campos de produção distantes da costa, onde o transporte frequente por navios seria economicamente inviável.

Ademais, Rampazzo (2022) explica que os sistemas de ancoragem dos FPSOs são fundamentais para sua operação segura. Existem diferentes tipos de sistemas de ancoragem, como o *turret* e o *Spread Mooring System* (SMS). O *turret* permite que o FPSO gire livremente em torno de um ponto fixo, mantendo-se alinhado com as condições ambientais predominantes, o que reduz as forças atuantes no casco. Já o SMS utiliza múltiplos pontos de ancoragem para fixar a unidade, oferecendo estabilidade adicional.

Conforme a visão de Rampazzo (2022), os risers são componentes críticos que conectam o FPSO aos poços submarinos. Eles transportam os hidrocarbonetos do fundo do mar até a unidade flutuante. Existem diferentes configurações de risers, como os rígidos e os flexíveis, cada um com suas vantagens e desvantagens dependendo das condições específicas do campo de produção. A escolha da configuração adequada é crucial para garantir a eficiência e a segurança das operações de produção.

De acordo com o Programa de Descomissionamento de Instalações (2020), um FPSO combina diversas funções em uma única unidade: produção, processamento,

armazenamento e exportação de petróleo e gás. A produção ocorre através da perfuração de poços submarinos que são conectados ao FPSO por meio de risers e oleodutos submarinos. O processamento envolve a separação do óleo, gás e água produzidos, preparando-os para armazenamento ou exportação.

Os módulos de processamento incluem separadores, aquecedores, e sistemas de injeção de água e gás. Estes módulos são essenciais para garantir a eficiência e a segurança das operações de produção. A operação de um FPSO envolve uma série de procedimentos complexos e rigorosos, como a despressurização, drenagem e limpeza dos sistemas de processamento e tanques. Estas atividades são fundamentais para a manutenção da integridade da unidade e para minimizar riscos ambientais. A segurança operacional é um aspecto crítico, com protocolos rigorosos para a gestão de emergências e a prevenção de acidentes.

Rampazzo (2022) ressalta ainda que os processos de produção no FPSO são altamente complexos e integrados. A unidade é equipada com instalações de processamento que tratam o petróleo bruto, separando os componentes indesejados e preparando o produto final para armazenamento ou transferência. Essas instalações incluem sistemas de separação, tratamento de água, compressão de gás e outras tecnologias avançadas para otimizar a produção e garantir a qualidade do petróleo e do gás. Rampazzo (2022) também menciona que os FPSOs possuem sistemas de *offloading* para transferir o petróleo armazenado para navios-tanque. Esse processo, conhecido como *offloading*, é realizado através de mangueiras flutuantes conectadas entre o FPSO e o navio aliviador. A operação requer uma coordenação precisa para garantir a segurança e a eficiência, especialmente em condições climáticas adversas. Os sistemas de offloading são projetados para minimizar o tempo de transferência e maximizar a segurança operacional.

Assim como nas refinarias, os FPSOs demandam uma abordagem robusta para a gestão e manutenção de ativos críticos, mas enfrentam desafios únicos relacionados à operação offshore, como condições ambientais adversas, logística de manutenção e a necessidade de maximizar a confiabilidade e segurança em uma plataforma flutuante. O design e a operação dessas plataformas devem considerar fatores como estabilidade, integridade estrutural, dinâmica de fluido e segurança contra incêndios e explosões. A operação eficiente de um FPSO também requer uma gestão integrada dos fluxos de óleo e gás, sistemas de separação, injeção de água e

gás, e descarregamento para navios-tanque. A conectividade e coordenação entre esses subsistemas são vitais para manter a continuidade da produção e evitar desastres ambientais.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Inicialmente, os modelos de manutenção eram concebidos para abordar um único componente, o que conferia a eles uma relativa simplicidade. No entanto, essa perspectiva evoluiu com o avanço da modelagem de sistemas compostos por múltiplos componentes. Um dos estudos pioneiros sobre modelos de manutenção multicomponentes foi conduzido por Butterworth (1972), que introduziu dois modelos de teste de falha para um sistema *k-out-of-n*. Com base em premissas fundamentais, o autor desenvolveu um modelo para determinar o estado de cada componente no caso de falha do sistema, enquanto o segundo modelo visava caracterizar o próprio sistema. Esses modelos são fundamentais para a análise de confiabilidade em sistemas com múltiplos componentes, contribuindo para o entendimento das implicações das falhas individuais no desempenho do sistema como um todo. Além dessa contribuição, vale destacar também os trabalhos de Thomas (1986) e Cho e Parlar (1991) trouxeram grandes contribuições para esse campo de estudo.

Thomas (1986) fornece uma visão geral abrangente dos modelos de manutenção e substituição para sistemas multicomponentes. No contexto desse tipo de sistema, como equipamentos industriais complexos ou redes de computadores, a confiabilidade e a manutenibilidade são aspectos cruciais para garantir o desempenho contínuo e eficiente desses sistemas. Os diversos modelos discutidos consideram fatores como a taxa de falhas dos componentes, a eficácia da manutenção, o custo da manutenção e substituição, entre outros. Tais fatores não eram considerados simultaneamente por um mesmo modelo, ou seja, normalmente os modelos de manutenção consideravam um ou dois aspectos do sistema.

Cho e Parlar (1991) investigaram uma variedade de modelos de manutenção que foram desenvolvidos para lidar com sistemas multicomponentes. Além de analisar os desafios e limitações dos modelos existentes na época. Dentre as dores apontadas, têm-se a complexidade das unidades. Muitos modelos de manutenção não capturavam adequadamente as interações entre diferentes unidades de um sistema devido a características de complexidade, como a interdependência dos componentes, a qual dificultava as análises (CHO & PARLAR, 1991).

Zheng, Paiva e Gurciullo (2020) argumentam que as medidas de importância são essenciais para a manutenção preditiva e inteligente, especialmente quando

aplicadas a sistemas complexos de manufatura e industriais. Essas medidas permitem a identificação de componentes críticos que podem impactar significativamente a confiabilidade e a operação do sistema. As medidas de importância são utilizadas para desenvolver modelos probabilísticos de confiabilidade, que podem prever a falha de componentes e sugerir ações preventivas. Este enfoque não só melhora a precisão das previsões de falha, mas também otimiza os planos de manutenção com base na criticidade dos componentes. (ZHENG, PAIVA & GURCIULLO, 2020).

As medidas de importância desempenham um papel central na otimização dos planos de manutenção, garantindo que os recursos sejam alocados de forma eficiente para melhorar a confiabilidade do sistema e minimizar os custos operacionais. O enfoque proativo e baseado em dados é essencial para alcançar redução de tempo de inatividade não planejado e operações autônomas contínuas. (ZHENG, PAIVA & GURCIULLO, 2020). O estudo desenvolvido pelos autores auxilia a compreensão prática das medidas de importância na atualidade e seu potencial de contribuição para a manutenção de sistemas complexos.

Para explorar o uso dessas medidas no contexto do petróleo, Gao *et al.* (2010), propõe o uso de medidas de importância baseadas em custos para realizar a análise da criticidade. Os autores aplicam essas medidas de importância baseadas em custos a um estudo de caso de uma instalação de produção de petróleo e gás (O&G) com base na justificativa de que os custos de manutenção e as perdas de produção podem representar uma parcela significativa dos custos totais na indústria de O&G. Como o problema possui essa premissa, outros tipos de medidas de importância não foram utilizados, ou seja, o trabalho foi profundo no que tange apenas os aspectos de custo.

Para Daemi e Ebrahimi (2012), as medidas de importância da confiabilidade são cruciais para avaliar o impacto da falha de componentes individuais em sistemas de transmissão elétrica. Essas medidas auxiliam na identificação de pontos fracos no sistema, na priorização de melhorias e na alocação eficiente de recursos para maximizar a confiabilidade do sistema. Utilizando redes Bayesianas, os autores propõem um método inovador para calcular essas medidas, aproveitando simulações de Monte Carlo para gerar dados de treinamento que alimentam a construção da rede.

Na prática, Daemi e Ebrahimi (2012) aplicam essas medidas a sistemas de transmissão complexos, utilizando a rede Bayesiana para calcular probabilidades condicionais e marginais de eventos de falha. Esse método permite uma avaliação

precisa e eficiente, superando as limitações de métodos analíticos tradicionais e simulações extensivas de Monte Carlo, que podem ser computacionalmente onerosas. Os resultados apresentados pelos autores em seus estudos mostram que as medidas de importância de confiabilidade permitem a priorização de componentes críticos para inspeção e manutenção preventiva, auxiliando na alocação de recursos para maximizar a confiabilidade do sistema.

Por mais que o estudo de Daemi e Ebrahimi (2012) também explore apenas uma abordagem de medidas de importância, comprehende-se o potencial da utilização dessa ferramenta em conjunto com outras metodologias, nesse caso foram as redes Bayesiana e simulação de Monte Carlo. Na engenharia de manutenção, observa-se que diversas contribuições são feitas por meio da multidisciplinaridade e pelo desenvolvimento de pesquisas que integram diferentes abordagens. O impacto disso para a pesquisa é ampliação das discussões e do conhecimento, proporcionando evoluções no campo de estudo.

Nesse sentido, o estudo conduzido por Bakir, Yildirim & Ursavas (2021) corrobora com o argumento de evolução do conhecimento por meio da aplicação de metodologias integradas, pois apresentam um *framework* de otimização integrada para análise preditiva de múltiplos componentes na operação e manutenção de parques eólicos. Assim como no contexto do setor petroleiro, na indústria de energia eólica, é fundamental garantir o desempenho e a confiabilidade dos parques eólicos, que são compostos por vários componentes, como turbinas, geradores e sistemas de transmissão. O *framework* é inovador por combinar análise preditiva e otimização para melhorar a operação e manutenção de parques eólicos.

Dessa forma, as medidas de importância são amplamente aplicadas para auxiliar na tomada de decisões relacionadas à manutenção, como a priorização de componentes para inspeção, substituição ou reparo. Os trabalhos do pesquisador Shaomin Wu [Wu et al. (2013); Wu et al. (2016)] têm contribuído para expandir o conhecimento teórico e prático sobre medidas de importância na engenharia de manutenção. Uma das principais contribuições é a proposta e desenvolvimento de métodos avançados de análise de importância.

Wu et al. (2016) aborda o valor de vincular a importância dos componentes à otimização da política de manutenção preventiva. O artigo explora diferentes métodos de análise de importância e discute a integração dessas medidas de importância na

formulação de políticas de manutenção preventiva, considerando fatores como custo, tempo de inatividade e riscos. A vinculação desses dois campos de estudo resulta num *framework* proposto pelo autor que visa melhorar a eficiência e a eficácia da manutenção, maximizando a confiabilidade do sistema e minimizando os custos associados.

De acordo com Espiritu, Coit e Prakash (2007), várias medidas de importância foram propostas para sistemas elétricos, incluindo as métricas de Birnbaum, Criticidade, *Risk Achievement Worth*, *Risk Reduction Worth* e Fussell-Vesely. Essas medidas foram adaptadas para serem aplicáveis diretamente aos sistemas de transmissão elétrica, considerando a taxa de interrupção sustentada dos componentes em vez da probabilidade de falha. Enquanto as medidas de importância estão sendo amplamente aplicadas no setor elétrico, nota-se que há uma oportunidade de estudo dessa ferramenta no setor de óleo e gás.

Nota-se que o conhecimento gerado acerca das medidas de importância está em constante aprimoramento e cada vez mais relações complexas de importância são estudadas. Por exemplo, Zhang *et al.* (2022) apresenta um modelo de otimização que leva em consideração a importância dinâmica dos componentes na política de manutenção de sistemas multicomponentes. A abordagem proposta tem o potencial de melhorar a eficiência e a eficácia da manutenção, garantindo a confiabilidade e o desempenho adequados do sistema em diferentes períodos.

Portanto, ao explorar a literatura acerca de sistemas multicomponente e de medidas de importância, há uma vasta variedade de modelos e métodos sendo empregados para estudar os mais diversos setores. Sendo os Modelos de Decisão Multicritério também empregados em conjunto com as medidas de importância com o objetivo de apoiar a tomada de decisão acerca da manutenção de um sistema composto por vários itens.

Almoghathawi *et al.* (2017) utiliza um método análise de decisão multicritério, o PROMETHEE II, para identificar e classificar a importância dos componentes num sistema de rede. Esse método envolve a consideração de seis critérios, os quais são medidas de importância desenvolvidas pelo próprio autor, como conectividade, centralidade, importância estrutural e capacidade de resposta, a fim de obter uma visão abrangente dos componentes. Os resultados mostram que a abordagem de análise de decisão multicritério em conjunto com as medidas de importância é eficaz

na identificação e classificação da importância dos componentes da rede, fornecendo informações valiosas para o planejamento e a gestão eficientes de redes complexas.

Enquanto a maioria das pesquisas realizadas até o momento não integra as medidas de importância com modelos de decisão, recentemente tem surgido um interesse crescente no meio acadêmico em contribuir para o desenvolvimento científico nesse campo de estudo. Há pouco tempo, Silva (2019) desenvolveu um modelo de decisão multicritério que combina as preferências do decisão com medidas de importância de componentes, para otimizar a manutenção de um sistema multicomponente. Utilizando o método ELECTRE II, o modelo identifica os componentes críticos nas fases de projeto, operação e manutenção de um sistema de armazenamento de fluidos, considerando critérios como confiabilidade, segurança e custo.

Portanto, com base na revisão da literatura, constata-se a oportunidade de estudar o uso das medidas de importância para apoiar o plano de manutenção em sistemas complexos na cadeia de petróleo devido aos poucos trabalhos desse tema no setor. Somado a isso, é notável que a integração dessas medidas com modelos de decisão multicritério são ainda menos explorados em qualquer tipo de indústria.

Diante de todo embasamento e discussão apresentado ao decorrer do trabalho, o tema em estudo se apresenta como um potencial contribuidor para a área de engenharia de manutenção. A lacuna existente nesse tema se mostra como uma condição favorável para exploração dele a fim de contribuir com o plano de manutenção preventiva de ativos físicos na indústria do petróleo. Assim, o presente trabalho visa consolidar um modelo de decisão multicritério baseado no método FITradeoff em conjunto com diferentes medidas de importância.

4 SISTEMA E APLICAÇÃO NUMÉRICA

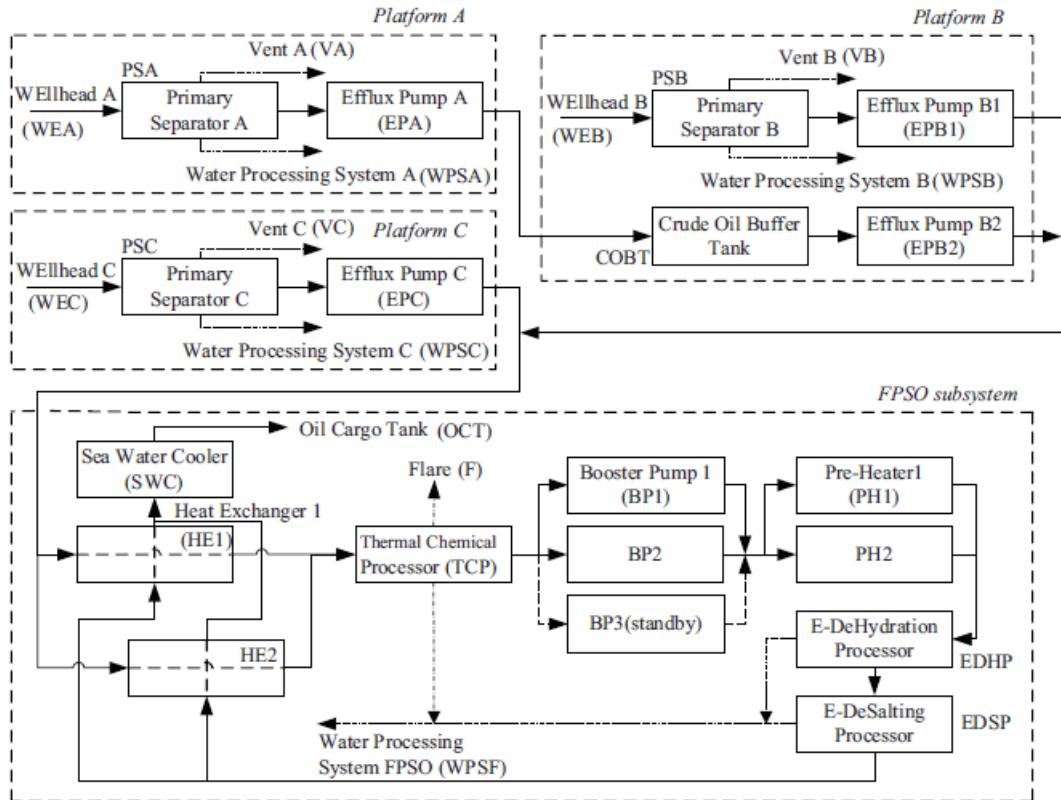
Nesta seção, são apresentadas as características do sistema escolhido bem como os resultados da aplicação das medidas de importância. Para cada tipo de medida, os resultados são apresentados e analisados. Por último, com base no método FITradeoff, é proposto um modelo de decisão multicritério que utiliza as medidas de importância como *input* para os critérios e, assim, apoiar a tomada de decisão quanto a manutenção preventiva de um sistema.

4.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema estudado faz parte de um FPSO que opera em um campo de petróleo offshore. Este tipo de plataforma inclui diversos tipos de sistemas, como sistema de processamento de petróleo bruto, um sistema de armazenamento de petróleo bruto, um sistema de proteção contra incêndios e salvamento, sistema de energia e instrumentação, entre outros. Neste trabalho, concentra-se o foco no sistema de processamento de petróleo bruto, o qual foi objeto de estudo por Meng, Kloul e Rauzy (2015). Portanto, o *layout* do sistema, os componentes e os dados de confiabilidade utilizados por essa pesquisa foram obtidos a partir do artigo desenvolvido pelos três autores.

O sistema de processamento de petróleo bruto do FPSO é composto por quatro subsistemas: plataformas A, B, C e o subsistema FPSO, como ilustrado na figura 2. Nota-se que as setas sólidas representam o fluxo de petróleo bruto, enquanto as setas tracejadas representam o gás separado ou água residual.

Figura 2: Sistema de processamento de petróleo bruto do FPSO



Fonte: Meng, Kloul e Rauzy (2015)

O processo de transporte do óleo bruto para o subsistema de processo pode ser compreendido da seguinte forma:

1. A plataforma A recebe o petróleo bruto e o transfere para um tanque intermediário na Plataforma B.
2. A plataforma B recebe petróleo diretamente do poço além do recebido pela plataforma A.
3. A plataforma C recebe o petróleo bruto e, juntamente com o petróleo produzido na plataforma B, o óleo total é transportado para um subsistema de processamento e armazenamento inicial desse insumo.
4. O petróleo total das plataformas é transportado para os trocadores de calor do subsistema do FPSO e ele segue por todos os equipamentos para ser processado.

A indisponibilidade de qualquer uma das plataformas A, B ou C não pode levar à indisponibilidade de produção das plataformas. Entretanto, a indisponibilidade

simultânea das plataformas B e C pode resultar na indisponibilidade de produção e a indisponibilidade apenas da plataforma B pode acionar o fechamento da plataforma A (MENG, KLOUL & RAUZY; 2015).

As plataformas A e C possuem dois tipos de componentes: processador primário e bomba de efluxo. Enquanto a plataforma B apresenta, além desses, um tanque para armazenar óleo bruto. Já o subsistema do FPSO é composto por dois trocadores de calor em paralelo (HEs, do inglês *Heat Exchangers*), um resfriador de água do mar (SWC, de *Sea Water Cooler*), três bombas de reforço em paralelo (BPs, de *Booster Pumps*), dois pré-aquecedores em paralelo (PHs, de *Preheaters*), bem como três processadores. A função principal desse subsistema é processar o petróleo primariamente separado para alcançar a qualidade padrão.

O petróleo total proveniente das plataformas é inicialmente enviado para os HEs para aumentar sua temperatura. Após passar pelos trocadores de calor, o fluxo vai para o processador químico térmico (TCP, do inglês *Thermal Chemical Processor*), que separa o petróleo do gás e da água restante. O TCP utiliza agentes químicos, a gravidade e um aquecedor interno para desidratação. O gás é enviado para a *flare* para queima, e a água é entregue ao sistema de processamento de água do FPSO (WPSF, de *Water Processing System of FPSO*).

Observa-se a seguir os dados disponíveis sobre esse sistema:

Figura 3: Dados de confiabilidade e política de manutenção do sistema

Componentes	Taxa de falha/h ⁻¹	Tempo de reparo/h	Manutenção
PSA,PSB,PSC, TCP	2.63E-4	8.2	CM+PM
EPA,EPB1,EPB2,EPC	5.51E-4	32.7	CM
COBT	1.63E-4	30.3	CM
HE1,HE2	2.00E-4	8.9	CM+PM
EDHP,EDSP	2.63E-4	8.2	CM
BP1,BP2,BP3	1.03E-3	5.0	CM
PH1,PH2	6.96E-5	42.2	CM
SWC	9.78E-5	70.0	CM

Fonte: Meng, Kloul e Rauzy (2015)

Figura 4: Política de Manutenção Preventiva do sistema

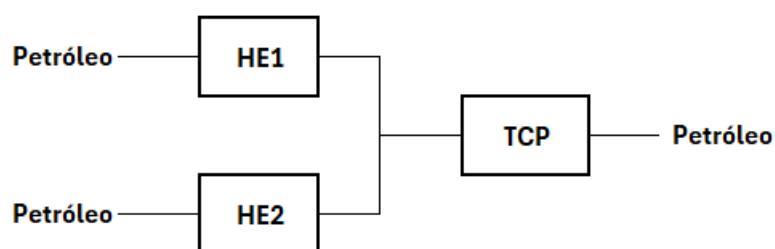
Componentes	Intervalo/h	Duração/h
PSA, PSB, PSC	4380	36
HE1, HE2	8760	36
TCP	17520	72

Fonte: Meng, Kloul & Rauzy (2015)

A partir da política de manutenção do sistema, comprehende-se que apenas 6 componentes são submetidos a manutenção preventiva, sendo 3 presentes separadamente nas plataformas e 3 no subsistema do FPSO. (MENG, KLOUL & RAUZY; 2015). Essa informação encontra-se na Figura 3, a qual tem como fonte o artigo utilizado como referência para a obtenção dos dados.

Para a aplicação das medidas de importância, os componentes do subsistema do FPSO submetidos a manutenção preventiva são adequados para análise a partir do momento que eles são recortados e compreendidos como sendo um outro subsistema. Dessa forma, considera-se o subsistema complexo composto por 3 componentes, dois HEs e um TCP, como o sistema de aplicação pelo fato deles estarem diretamente conectados no sistema, conforme Figura 2.

Figura 5: Subsistema de componentes com política de manutenção preventiva



Fonte: Autora (2024)

4.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA

A seguir, as medidas de importância utilizadas para quantificar numericamente os componentes em cada um dos critérios:

- Confiabilidade: Medida de Importância Crítica (I^{CR})
- Disponibilidade: Medida de Importância de Birnbaum (I^A)
- Risco: Risk Reduction Worth (I^{RRW})
- Custo: Medida de importância de custo (I^{PMBc})

A medida de importância crítica foi escolhida por ser adequada à finalidade de estudos de manutenção, pois seu processo de priorização considera o viés de que o sistema falhou e deseja-se identificar o componente com a maior probabilidade de ser o causador da falha. A partir do conhecimento das probabilidades de cada componente, é possível estabelecer a prioridade dos componentes. Dessa forma, essa medida irá indicar qual é o componente crítico para o funcionamento do sistema com base no valor da sua medida, quanto maior o I^{CR} de um equipamento, mais importante em termos de confiabilidade.

Para o critério de disponibilidade, considerou-se a mensuração da medida de importância por meio da medida de Birnbaum, ou seja, o mesmo valor de confiabilidade foi adotado para a disponibilidade por efeito de simplificação. Lembrando que a equação da medida de importância de disponibilidade e Birnbaum se diferem apenas pela variável que utilizam.

Daemi e Ebrahimi (2012) argumentam que o RRW é apropriado para contextos que buscam substituir ou melhorar componentes para aumento da confiabilidade do sistema, então essa medida foi adotada considerando esse objetivo.

Por fim, a medida de importância de custo segue o mesmo princípio da medida de confiabilidade potencial de melhoria, mas difere ao incluir o custo tanto do componente perfeito quanto do componente em seu estado atual.

Os resultados da tabela a seguir mostram o valor da confiabilidade (R) de cada componente, a qual foi calculada considerando a função $R(t) = e^{-\lambda t}$ com um intervalo de 5.000 horas (t). A distribuição exponencial foi selecionada devido à disponibilidade dos dados de taxa de falha pelos autores, adotando-os como constante. Os valores

de taxa de falha (λ) utilizados constam na Figura 3 para os componentes HE1 e TCP. Já para o HE2, estimou-se um valor de confiabilidade próximo do original para que os trocadores de calor não tivessem a mesma confiabilidade, como apontado por Meng, Kloul & Rauzy (2015). Essa abordagem foi escolhida para que o comportamento do sistema se aproximasse mais de situações reais em que componentes redundantes apresentam confiabilidades distintas, uma vez que, na prática, fatores como idade, manutenção e condições de operação frequentemente resultam em diferentes níveis de confiabilidade para cada componente (MODARRES, 2016; BIROLINI, 2017).

A partir da confiabilidade dos componentes, é possível obter a importância de cada um nos critérios de confiabilidade, disponibilidade e risco. Por outro lado, os valores para a medida de importância de custo foram estimados a partir do julgamento da autora deste trabalho devido à falta dessa informação para o sistema analisado. Com isso, obtém-se todas as informações numéricas para calcular as medidas de importância:

- Disponibilidade: $I^A_i = R_s(1_i, r(t)) - R_s(0_i, r(t))$

$$I^A_i = P(\text{Sist. funcionando} \mid i \text{ ativo}) - P(\text{Sist. funcionando} \mid i \text{ falha})$$

$$I^A_{HE1} = R_{TCP} - R_{HE2}(R_{TCP}) = 0,268 - (0,426)(0,268) = \mathbf{0,153}$$

$$I^A_{HE2} = R_{TCP} - R_{HE1}(R_{TCP}) = 0,268 - (0,368)(0,268) = \mathbf{0,169}$$

$$I^A_{TCP} = R_{paralelo} - 0 = 1 - (0,632)(0,574) = \mathbf{0,637}$$

- Confiabilidade: $I^{CR}_i = \frac{I^B(i|t)[1-R_i(t)]}{1-R_s[r(t)]}$

$$I^{CR}_{HE1} = \frac{0.153(0.632)}{1 - 0,170} = \mathbf{0,116}$$

$$I^{CR}_{HE2} = \frac{0.169(0.574)}{1 - 0,170} = \mathbf{0,117}$$

$$I^{CR}_{TCP} = \frac{0.637(0.732)}{1 - 0,170} = \mathbf{0,562}$$

- Custo: $I^{PMBc}_i = CR_s(1_i, r(t)) - CR_s(r(t))$

Os custos de manutenção preventiva geralmente representam cerca de 10% a 15% do custo de instalação por ano. Esse tipo de manutenção inclui inspeções regulares e limpezas, visando evitar problemas como incrustação e corrosão, que podem comprometer a eficiência do equipamento. Estudos indicam que os custos de manutenção anual de trocadores de calor variam entre €2.500 e €8.000

(aproximadamente R\$ 15.000 a R\$ 48.000), dependendo do tipo de equipamento e das condições operacionais (CHALMERS, 2016). Como os equipamentos estão no contexto robusto e complexo da cadeia do petróleo, será utilizado para o HE1 e HE2 valores próximos ao máximo apresentado por Chalmers (2016).

Já para TCPs, o custo anual de manutenção preventiva em instalações de grande porte pode variar entre R\$ 40.000 e R\$ 100.000. Essas práticas de manutenção são essenciais para reduzir o tempo de inatividade não planejado e aumentar a vida útil dos ativos, sendo amplamente adotadas em indústrias químicas de alta complexidade (INDUSTRY TODAY, 2021). A partir desse intervalo de valores, será selecionado um custo intermediário de R\$ 60.000,00 para o TCP.

$$I^{PMB}{}_i = (C_{i,R=1} + C_{SISTEMA}) - (C_{SISTEMA})$$

$$I^{PMB}{}_{HE1} = C_{HE1,R=1} = \mathbf{40.000}$$

$$I^{PMB}{}_{HE2} = C_{HE2,R=1} = \mathbf{45.000}$$

$$I^{PMB}{}_{TCP} = C_{TCP,R=1} = \mathbf{60.000}$$

Tabela 1: Parâmetros de confiabilidade e medidas de importância

Componente	R	I ^{CR}	I ^A	I ^{RRW}	I ^{PMB}
HE1	0,368	0,116	0,153	1,13	40000
HE2	0,426	0,117	0,169	1,13	45000
TCP	0,268	0,562	0,637	2.28	60000
Sistema	0,170	-	-	-	-

Fonte: Autora (2024)

Primeiramente, nota-se que, diferentemente das demais medidas, a medida de importância de risco pode assumir valores maiores que 1 (um) e a medida de importância de custo tem uma ordem de grandeza superior as demais por ser calculada a partir de valores monetários.

A partir dos valores obtidos na Tabela 1, observa-se que o TCP é o equipamento que apresenta maiores valores em todos os critérios. Ao contrário das outras medidas, os componentes que possuem os menores valores de custo são considerados como os mais críticos. Portanto, o TCP é o equipamento crítico nos

critérios de confiabilidade, disponibilidade e risco, enquanto o HE1 é o componente crítico no quesito custo.

Sobre a medida de importância de custo, a medida avalia o impacto financeiro de cada componente em termos de manutenção. O componente com o menor valor de importância de custo é o que, ao ser mantido em seu estado perfeito, apresenta o maior ganho em termos de economia de manutenção.

Segundo a política de manutenção preventiva apresentada por Meng, Kloul e Rauzy (2015), os trocadores de calor estão sendo submetidos a manutenção preventiva em um intervalo de 8760h, que representa o período de um ano (365 dias). Para o TCP, o intervalo de manutenção preventiva é duas vezes maior, acontecendo numa periodicidade bianual. A duração da manutenção também é o dobro para o TCP, o que condiz com a característica mais complexa desse componente para o sistema.

Tal política está aplicando mais frequentemente uma manutenção preventiva no equipamento que não é crítico para o sistema em termos de confiabilidade, disponibilidade e risco. Logo, o uso conjunto dos resultados numéricos das medidas de importância junto ao responsável técnico pela manutenção é capaz de rever e melhorar a política atual a partir da consideração de todos os critérios.

Dessa forma, as medidas de importância dos componentes podem ser calculadas regularmente a partir do momento que há disponibilidade ou oportunidade de realizar uma manutenção preventiva. Esse resultado aplicado num modelo de decisão multicritério irá fornecer a base para apoiar o processo de decisão acerca da manutenção preventiva para o componente mais importante para o sistema.

4.3 MODELO DE DECISÃO MULTICRITÉRIO

Conforme observado na literatura, as medidas de importância podem ser utilizadas por modelos de decisão multicritério. A partir de todos os trabalhos estudados, nota-se um *gap* quanto ao emprego de métodos que possuem racionalidade compensatória. Por isso, buscou-se também consolidar um modelo de decisão multicritério baseado no método FITradeoff em conjunto com as medidas de importância do sistema com intuito de apoiar o plano de manutenção de um sistema complexo na cadeia de petróleo.

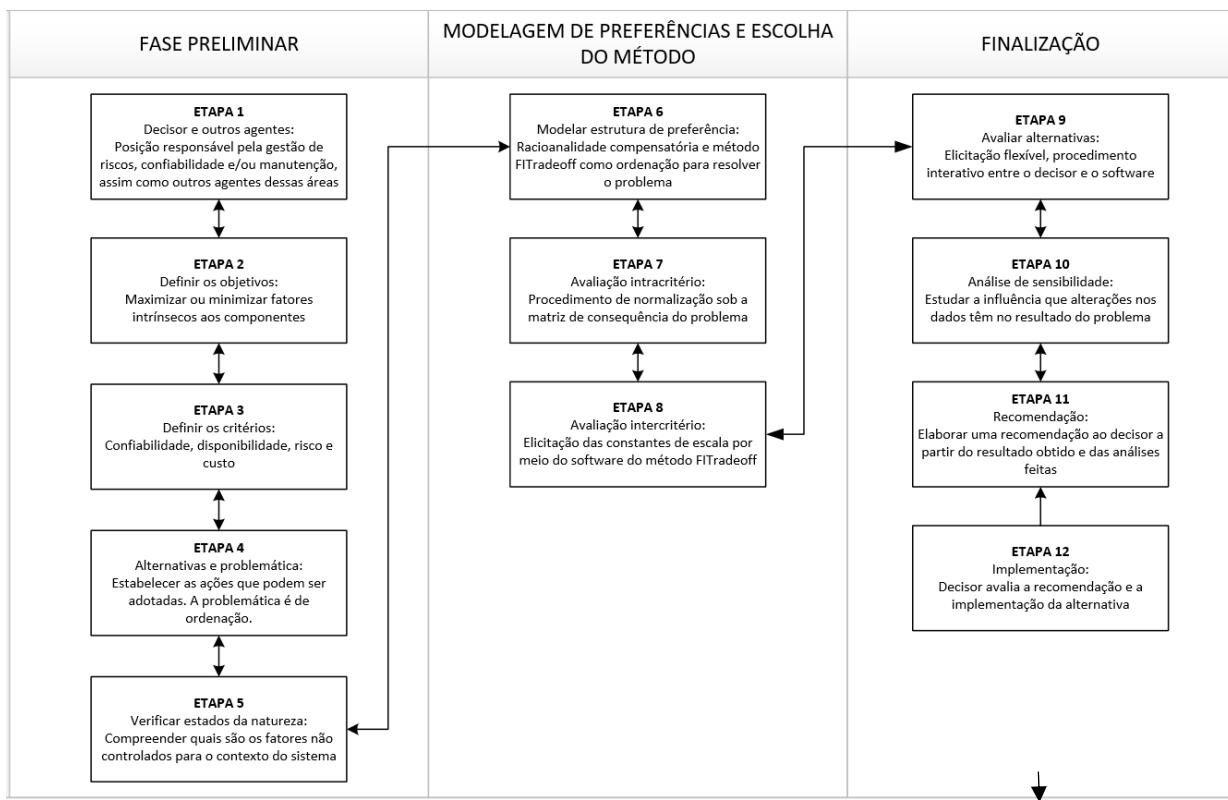
Os dados obtidos por meio das medidas de importância podem ser utilizados pelo método FITradeoff com o objetivo de apoiar a tomada de decisão acerca da manutenção preventiva do sistema. Com isso, é possível construir um modelo que, embora determinístico (não considera incertezas nos dados), pode ser uma abordagem valiosa para o planejamento da manutenção preventiva, especialmente quando há informações suficientes e confiáveis disponíveis.

A metodologia utilizada para esse estudo é baseada no *framework* de tomada de decisão proposto por De Almeida *et al.* (2015), que construiu um procedimento de resolução de um problema de decisão composto por 12 etapas e dividido em três grandes estágios:

1. Fase preliminar
2. Fase de modelagem de preferências e escolha do método
3. Fase de finalização

As medidas de importância apresentadas anteriormente e o método FITradeoff foram incorporados no *framework* do modelo de decisão proposto nesse estudo:

Figura 6: Framework do modelo de decisão multicritério proposto



Fonte: Autora (2024)

O FITradeoff Decision Support System está disponível para ser acessado online por meio do link: <http://www.cdsid.org.br/FITradeoff/>. O software estará disponível para uso após a realização do *login* ou registro, caso seja um novo usuário.

Figura 7: Página Inicial do FITradeoff



Fonte: Pratical User Guide - FITradeoff (2023)

4.3.1 Fase Preliminar

O modelo inicia com a definição do decisor e dos outros agentes relevantes para o processo de tomada de decisão. No contexto do estudo, deve-se identificar quem é o responsável por tomar decisões acerca da manutenção do sistema escolhido na cadeia do petróleo. Essa pessoa pode ser um Engenheiro Chefe de Manutenção que trabalha juntamente com um Engenheiro de Confiabilidade e Gestor de risco. Além das posições internas da empresa envolvidas diretamente no problema, deve-se também considerar stakeholders relevantes para o cenário.

A segunda etapa é definir os objetivos do problema de decisão multicritério, o modelo proposto estabelece os seguintes objetivo padrão:

- Maximizar a confiabilidade do componente;
- Maximizar a disponibilidade do componente;
- Minimizar os custos de manutenção;
- Minimizar os riscos do componente desencadear um evento que comprometa recursos humanos, materiais e o meio ambiente.

Ter os critérios bem definidos é essencial no processo de decisão, então, a partir dos objetivos apresentados, relaciona-se cada um deles á um critério que terá o papel de avaliar as alternativas. Os critérios são: confiabilidade, disponibilidade, custos e riscos, os quais são mensurados por meio das medidas de importância. Por isso, é preciso o *input* de dados dos componentes do sistema para que o cálculo da importância seja realizado posteriormente.

A próxima etapa é compreender as alternativas do problema, nesse caso o conjunto de ações que podem ser adotas é realizar a manutenção preventiva nos componentes do sistema. Por exemplo, se o sistema é composto por um total de 8 componentes, obtém-se 8 alternativas sendo elas: manutenção preventiva no componente 1, manutenção preventiva no componente 2 e assim sucessivamente até o componente 8.

A última etapa da fase preliminar refere-se a verificar os estados da natureza, ou seja, compreender os fatores que não são controlados pelo decisor, mas que impactar os resultados do processo. Essa reflexão é válida para conhecer e estar atendo a questões que estão fora do controle da organização; Entretanto, como forma de simplificação, os fatores aleatórios não serão incorporados no modelo e trata-se o problema como possuindo apenas variáveis determinísticas.

Tendo em vista tudo o que deve ser definido nessa fase, é possível desenvolver a matriz de consequência do problema e esse é um *output* fundamental dessa fase para que seja possível fazer a aplicação do método FITradeoff na fase subsequente. A tabela abaixo representa um modelo de matriz de consequência de um problema de decisão multicritério com n alternativas A_i e m critérios C_j , onde cada alternativa é avaliada em relação a cada um dos critérios.

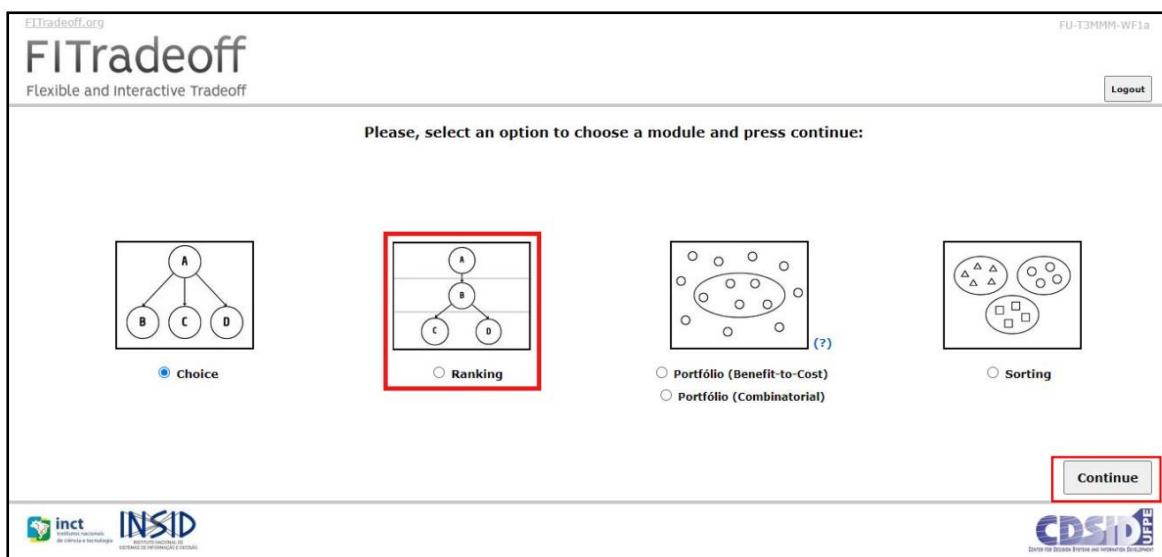
Tabela 2: Matriz de Consequência de um problema de decisão multicritério

Alternativas	Critérios			
	c_1	c_2	...	c_m
A_1	x_{11}	x_{12}	...	x_{1m}
A_2	x_{21}	x_{22}	...	x_{2m}
A_3	x_{31}	x_{32}	...	x_{3m}
...
A_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nm}

4.3.2 Modelagem De Preferência e Escolha Do Método

Ao conhecer o decisor do sistema escolhido, é importante garantir que ele esteja alinhado com a modelagem de preferências do método FITradeoff, caso contrário não será possível aplicar o modelo proposto. O decisor deve apresentar uma racionalidade compensatória e estar adequado a estrutura de preferência (P, I). Adota-se a problemática de ordenação para que o *output* obtido seja um ranking dos componentes que devem ser submetidos a manutenção preventiva com base nos critérios considerados. Dessa forma, o decisor pode escolher performar a ação no componente que está na primeira posição, mas também cabe avaliar, na fase de finalização, se outro componente, por exemplo o segundo ou terceiro do ranking, pode ser mais adequado para o momento.

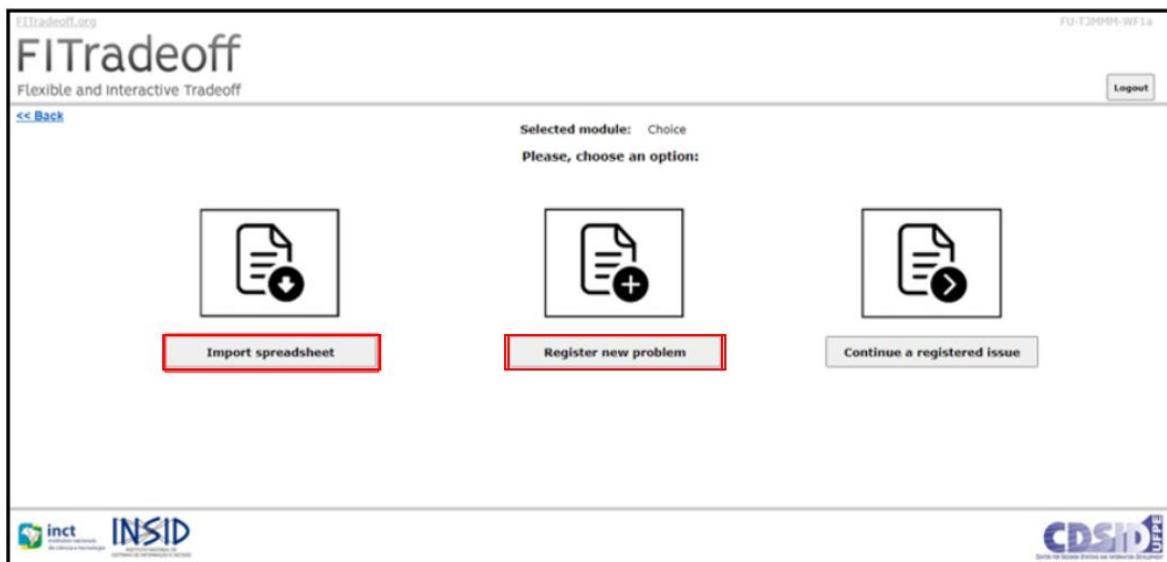
Figura 8: Tela de escolha do tipo de problema



Fonte: Pratical User Guide - FITradeoff (2023)

A avaliação intracritério é uma etapa essencial dentro do método, que envolve a análise detalhada de cada critério de forma individual antes de considerar as interações entre eles. O *input* dessa etapa é a matriz de consequência desenvolvida na fase preliminar, os dados da matriz podem ser inseridos no sistema por meio da importação de uma planilha ou de forma manual.

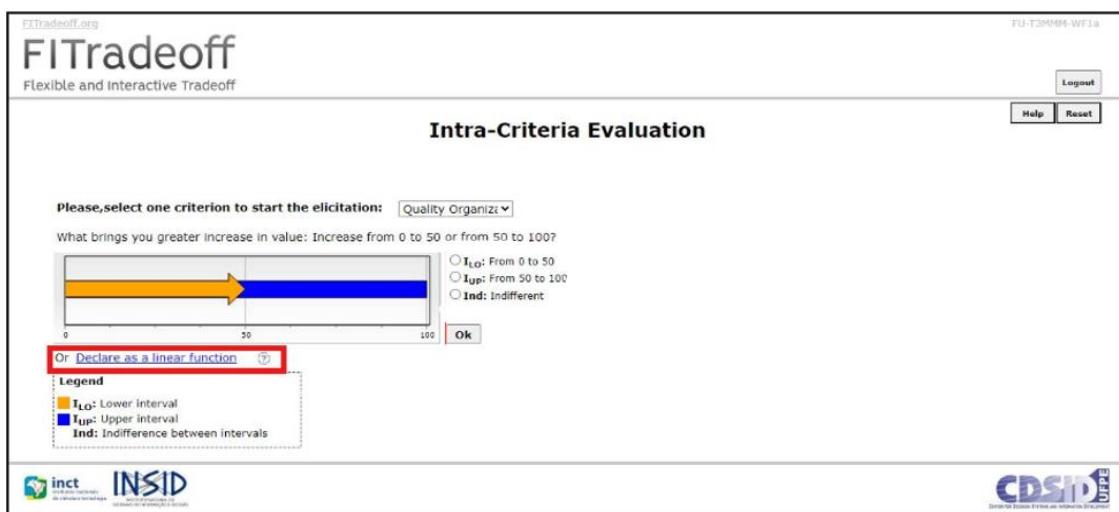
Figura 9: Importar dados do problema de uma planilha ou registrar manualmente



Fonte: Pratical User Guide - FITradeoff (2023)

A avaliação intracritério consiste na normalização das consequências de cada tipo de funções e, como forma de simplificação, o modelo proposto adota que todos os critérios assumem o comportamento de uma função linear. A normalização é realizada internamente pelo FITradeoff, onde a escala de avaliação será transformada numa escala intervalar (1,0) onde 1 representa o melhor valor e 0, o pior valor.

Figura 10: Declaração de função linear na avaliação intracritério

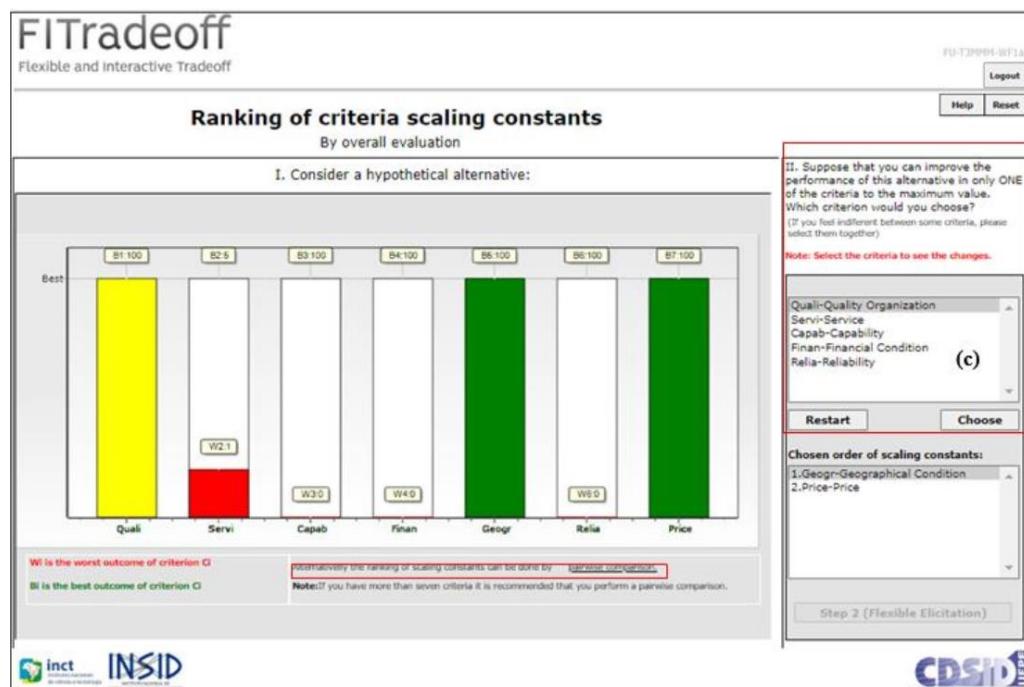


Fonte: Pratical User Guide - FITradeoff (2023)

O próximo passo é a avaliação intercritério, a qual é fundamental para o entendimento das preferências do decisor em relação aos critérios. Essa avaliação envolve identificar quais critérios são mais importantes e o quanto o decisor está disposto a trocar de desempenho em um critério por desempenho em outro. Este entendimento é obtido através de uma série de perguntas interativas e flexíveis entre o decisor e o sistema do FITradeoff.

Os pesos dos critérios representam a importância relativa de cada critério na decisão final. No método FITradeoff, os pesos não são definidos de forma direta, mas sim através de um processo de elicitação interativa, onde o decisor realiza comparações de *trade-offs* entre critérios. Após a comparação dos cenários e a resposta do decisor, o software retorna com a ordenação dos critérios, a qual reflete a ordem de importância desses fatores segundo a óptica do decisor.

Figura 11: Processo de ordenação de pesos pela Avaliação Global



Fonte: Pratical User Guide - FITradeoff (2023)

Uma vez que os pesos dos critérios são definidos, cada alternativa é avaliada em relação a esses pesos na etapa seguinte, a qual envolve calcular um valor agregado para cada alternativa com base em suas avaliações intracritério e nos pesos dos critérios.

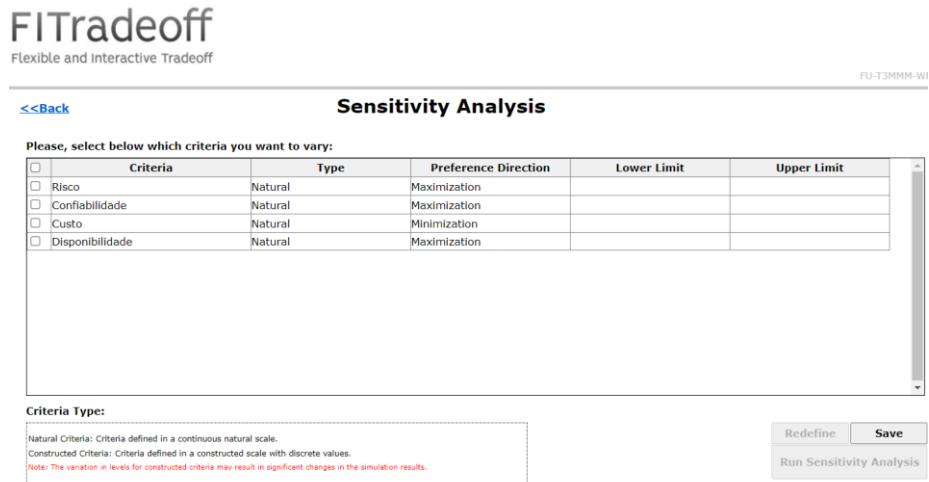
4.3.3 Finalização

O estágio final do modelo começa com a avaliação das alternativas. Nesse momento, são propostas situações hipotéticas para o decisor e ele escolhe qual a consequência preferível. Este processo é iterativo e ajuda a evitar a sobrecarga cognitiva, permitindo uma avaliação mais precisa das preferências do decisor. A análise de *trade-offs* é uma etapa crítica onde são apresentados cenários hipotéticos ao decisor, esses cenários ilustram diferentes combinações de desempenhos em vários critérios. O decisor deve escolher entre essas combinações, revelando suas preferências sobre como os critérios devem ser ponderados uns contra os outros.

Com base nas respostas obtidas durante a análise de *trade-offs*, é construído um modelo de preferências que representa matematicamente as interações entre os critérios. O resultado é uma classificação que reflete o desempenho geral de cada alternativa considerando todos os critérios. Portanto, o final da interação acontece quando o método completa a ordenação das alternativas e disponibiliza os componentes ordenados para o usuário.

A última etapa consiste em fazer a análise de sensibilidade, ou seja, estuda-se a influência que alterações nos dados de entrada (*input*) acarretam nos dados de saída (*output*) por meio modificações nos valores das constantes de escala ou na matriz de consequência, entretanto, sem modificar a ordem de importância. Assim, esse momento é caracterizado pela análise de sensibilidade às mudanças nos dados fornecidos pelo decisor. Essa verificação é importante para avaliar a robustez do modelo e verificar se o resultado obtido está adequado. O sistema apresenta um módulo que permite realizar esse procedimento internamente, conforme representado abaixo.

Figura 12: Análise de Sensibilidade no FITradeoff



Fonte: Autora (2024)

Consolidando todas as informações, deve-se elaborar uma recomendação detalhada e fundamentada para o decisor. Essa recomendação deve ser apresentada em uma reunião que envolva todos os atores relevantes no processo de decisão, incluindo membros das equipes de engenharia, manutenção, operações e gestão. O objetivo dessa reunião é validar a recomendação, garantindo que todas as partes interessadas compreendam e concordem com as prioridades e ações propostas.

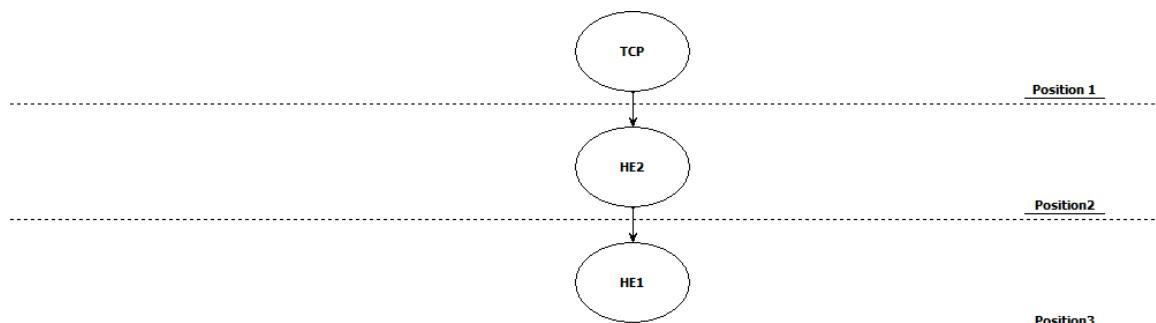
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para abordar a aplicação prática do modelo detalhado no tópico anterior, este trabalho recorreu a cenários hipotéticos, já que não foi possível estabelecer contato com um decisor da área de manutenção de um FPSO. Dado o contexto, foram definidos dois cenários exemplares, cada um com perfis de decisão distintos, para explorar como a ordenação dos critérios de risco, confiabilidade, custo e disponibilidade influencia a priorização dos componentes do sistema (HE1, HE2 e TCP). Esta abordagem visa ilustrar a aplicabilidade e a flexibilidade do modelo FITradeoff, oferecendo uma análise detalhada e comparativa das implicações de diferentes prioridades decisórias.

No primeiro cenário hipotético, o decisor obteve a seguinte ordem de priorização dos critérios: risco, confiabilidade, custo e, por último, disponibilidade. Essa ordenação reflete uma postura cautelosa e orientada à mitigação de riscos, o

que é crucial em sistemas complexos como os encontrados na cadeia do petróleo. O foco inicial no risco sugere que o decisor está mais preocupado com a prevenção de falhas catastróficas e possíveis impactos negativos na segurança e na operação do sistema. A confiabilidade, sendo o segundo critério mais importante, reforça a necessidade de assegurar que os componentes desempenhem suas funções conforme esperado ao longo do tempo, minimizando a probabilidade de falhas inesperadas. Após a avaliação intracritério, a ordenação das alternativas resultou em: TCP como a principal, seguido de HE2 e, finalmente, HE1.

Figura 13: Ordenação das alternativas – Cenário 1



Fonte: Autora (2024)

O TCP (processador químico térmico) emergiu como a alternativa prioritária devido à sua relevância em termos de risco e confiabilidade. Considerando que o TCP é um componente crítico que envolve processos complexos e potencialmente perigosos, faz sentido que ele ocupe a posição mais alta quando a prioridade é minimizar riscos. Sua posição também indica que, embora tenha um custo de manutenção mais alto, os benefícios em termos de segurança e desempenho compensam esse investimento, especialmente em um contexto em que a mitigação de riscos é fundamental.

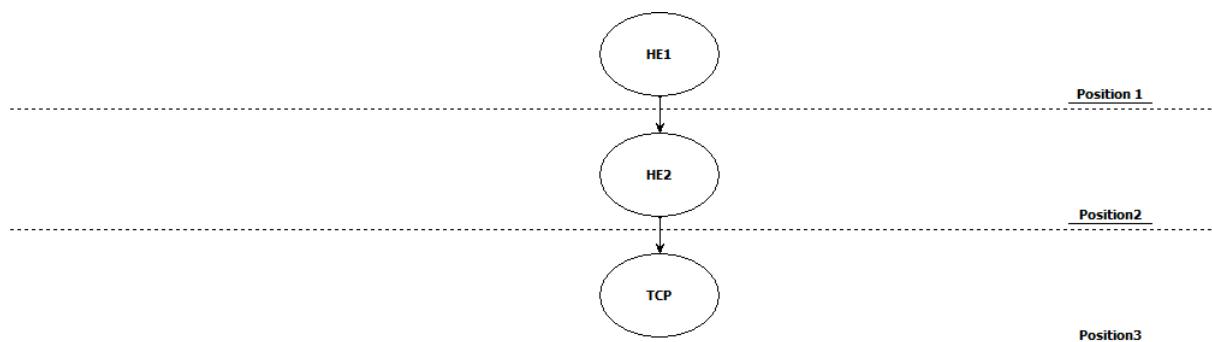
Em segunda posição, o HE2 é visto como um trocador de calor com uma confiabilidade relativamente alta e um nível aceitável de risco, o que o torna uma alternativa intermediária. A ordem do HE2 sugere que, embora seja menos crítico que o TCP em termos de risco, ele ainda oferece um bom equilíbrio entre custo e disponibilidade, alinhando-se bem com a estratégia do decisor. O fato de HE2 ser considerado mais prioritário que HE1 indica que suas características técnicas ou seu

impacto na operação geral do sistema são mais críticos, justificando uma maior atenção na gestão da sua manutenção.

Por fim, HE1 ocupa a última posição, refletindo uma menor prioridade na gestão da sua manutenção comparada às outras alternativas. Isso pode ser compreendido a partir do componente apresentar baixo e uma melhor confiabilidade que não é tão crítica quanto os outros componentes. Assim, essa priorização pode guiar a alocação de recursos de manutenção de maneira eficiente, concentrando esforços nos componentes que mais impactam a segurança e o desempenho geral do sistema.

No segundo cenário, a análise do decisor prioriza o critério de custo acima de todos os outros, seguido por confiabilidade, risco e, por último, disponibilidade. Essa preferência reflete uma abordagem de minimização de despesas, essencial para a viabilidade econômica em ambientes industriais altamente competitivos. A escolha do custo como critério mais importante sugere que o decisor está focado em maximizar a eficiência financeira do plano de manutenção, preferindo componentes que exigem menos investimento inicial e menores despesas contínuas. A confiabilidade em segundo lugar indica que, embora o custo seja a principal preocupação, o decisor ainda reconhece a importância de manter a operação estável e evitar falhas que possam gerar custos adicionais indesejados. A ordenação resultante das alternativas após a avaliação intracritério é HE1, HE2, e finalmente TCP.

Figura 14: Ordenação das alternativas – Cenário 2



Fonte: Autora (2024)

O HE1, sendo o trocador de calor com melhor valor na medida de importância de custo, é valorizado no topo da lista, o que alinha diretamente com a prioridade

principal do decisor. Esta escolha revela que, a eficiência de custo de HE1 é a característica decisiva e que ele representa uma alternativa que possui uma relação custo-benefício aceitável para o sistema. Já o HE2, posicionado após HE1, também destaca um bom equilíbrio entre custo e confiabilidade, mas é visto como um pouco menos vantajoso em termos financeiros do que HE1. A proximidade de HE2 a HE1 na ordenação sugere que ambos são componentes importantes para o sistema. Esta avaliação demonstra que HE2, embora um pouco mais dispendioso que HE1, ainda mantém uma confiabilidade que justifica o custo adicional, tornando-o uma escolha razoável.

Por outro lado, TCP é considerado o componente mais complexo e com custos de manutenção mais elevados, está em última posição. A sua posição inferior na ordenação sugere que, no contexto de uma política de minimização de custos, o decisor vê o TCP como a opção menos desejável, devido aos seus elevados custos de manutenção e à complexidade que não justifica os investimentos iniciais em comparação com os trocadores de calor. Este posicionamento ressalta a percepção de que, em um cenário onde o custo é o fator decisivo, as despesas associadas à manutenção de TCP são desproporcionais em relação aos benefícios percebidos em termos de confiabilidade e risco, o que leva à sua baixa prioridade.

O próximo passo para cada um dos cenários hipotéticos seria realizar a recomendação da ação a ser tomada. Durante a reunião de comunicação, é crucial destacar a base lógica e os dados que suportam a recomendação, mostrando como os critérios foram ponderados e como os *trade-offs* foram considerados. A discussão deve permitir que todos os envolvidos façam perguntas, expressem preocupações e ofereçam sugestões para refinamentos, promovendo um entendimento compartilhado e um consenso sobre a decisão a ser tomada.

É importante ressaltar que a responsabilidade final pela decisão de realizar a manutenção preventiva no componente recai sobre o decisor. Após a validação da recomendação, o decisor deve comunicar oficialmente a orientação ao time de manutenção responsável. Esta comunicação deve ser clara e precisa, detalhando os componentes que precisam de atenção, os recursos alocados, os prazos e quaisquer outras instruções relevantes para a execução eficaz da manutenção preventiva. O objetivo é assegurar que a implementação da decisão seja realizada de forma eficiente e alinhada com os objetivos estratégicos da organização.

5 CONCLUSÃO

No contexto da cadeia do petróleo, a complexidade do sistema produtivo se intensifica devido à presença de uma vasta gama de ativos físicos importantes, cada um com suas próprias necessidades de manutenção e operação. Empresas desse setor enfrentam desafios únicos na priorização desses ativos, em parte devido às limitações de recursos como tempo, mão de obra e orçamento. A necessidade de identificar quais componentes de um sistema requerem maior atenção é crucial para garantir a continuidade dos processos operacionais e a produção ininterrupta das unidades de negócios.

Além disso, a evolução tecnológica e a crescente complexidade dos sistemas produtivos resultam em ativos cada vez mais sofisticados, tornando ainda mais difícil a priorização e alocação de recursos de manutenção. Em indústrias intensivas em ativos, como a do petróleo, não é apenas a complexidade dos componentes que aumenta, mas também o seu número, dificultando a elaboração de um plano de manutenção ótimo. Em cenários onde os recursos são limitados, a capacidade de realizar uma manutenção eficaz depende da habilidade de compreender e priorizar corretamente os ativos físicos, assegurando que aqueles mais vitais para a operação continuem funcionando de forma eficiente e segura. Esta priorização é essencial para otimizar a alocação de recursos e garantir a sustentabilidade e a competitividade da empresa no mercado.

Esta pesquisa tem como objetivo geral compreender e aplicar as principais medidas de importância a fim de apoiar a tomada de decisão acerca da manutenção preventiva em um sistema de produção de petróleo offshore. Tal propósito foi atingido através do estudo de um sistema complexo de uma FPSO e utilização dos dados disponíveis desse sistema para aplicação das medidas de importância. A partir disso, foi possível também propor um modelo de decisão multicritério integrado com medidas de importância.

Os resultados obtidos a partir do uso de medidas de importância num sistema de uma FPSO evidenciam a capacidade que essas ferramentas possuem de fornecer base para a tomada de decisão acerca da manutenção preventiva de um sistema. Foi constatado que o componente TCP é o mais crítico para o sistema segundo 3 dos 4 critérios avaliados, perdendo apenas no quesito custo. Por mais que o fator econômico

seja significativo, não se deve restringir a tomada de decisão apenas a esse critério por causa das possíveis graves consequências para a operação, o meio ambiente e para as pessoas. Isso reforça a necessidade de considerar multicritérios para esse contexto.

O modelo de decisão multicritério FITradeoff em conjunto com as medidas de importância surge como uma ferramenta de gestão da manutenção valiosa e útil para decidir quais componentes do sistema são mais significativos e importantes, fornecendo uma ordenação dos itens com base nas preferências do decisor. A partir das preferências dos decisores considerados em cenários hipotéticos, foram obtidas diferentes ordenações para as alternativas. Com isso, foi possível desenvolver discussões e obter *insights* que beneficiam diretamente o plano de manutenção do sistema, permitindo priorizar alocação de recursos e atenção para os ativos físicos que são mais críticos.

Portanto, conclui-se que a aplicação das medidas de importância em políticas de manutenção preventiva pode otimizar a frequência e o momento das intervenções, assim como os custos e melhorando a eficiência operacional. Dessa forma, as medidas de importância fornecem uma base sólida para tomada de decisões sobre manutenção e alocação de recursos.

5.1 LIMITAÇÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A principal limitação do trabalho está na consideração da racionalidade compensatória para o decisor. Ao adotar essa premissa para o modelo, pode-se restringir a real complexidade inerente aos processos de decisão humanos no contexto estudado, que muitas vezes envolvem considerações multifacetadas e *trade-offs* não compensáveis. Assim, uma oportunidade para trabalhos futuros é a exploração de abordagens que permitam uma integração mais abrangente desses aspectos na modelagem da tomada de decisão, visando fornecer insights mais precisos e relevantes para os gestores do setor petrolífero.

Além disso, a aplicação das medidas de importância foi feita considerando apenas dados determinísticos, os quais podem oferecer uma visão limitada para o processo de decisão num ambiente complexo por não levar em conta a incerteza

inerente a muitas situações de decisão. No entanto, essa abordagem oferece oportunidades para trabalhos futuros explorarem como integrar dados determinísticos com informações probabilísticas. Além disso, pesquisas futuras poderiam investigar como os dados determinísticos podem ser usados de forma mais eficaz em diferentes contextos de decisão, como na engenharia e gestão de manutenção.

REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, A. T. O conhecimento e o uso de métodos multicritério de apoio a decisão. 2. ed., rev. e ampl. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2011.
2. ALMEIDA, A. T. Processo de Decisão nas Organizações: Construindo Modelos de decisão multicritério. São Paulo: Atlas, 2013.
3. ALMOGHATHAWI, Y. et al. A multi-criteria decision analysis approach for importance identification and ranking of network components. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 158, n. June 2015, p. 142–151, 2017.
4. Associação Brasileira de Normas Técnicas - CB-03 Comitê Brasileiro de Eletricidade / CE 03:056.01 - Comissão de Estudos de Confiabilidade. Confiabilidade e Mantenabilidade - NBR 5462. Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. Rio de Janeiro, 1994.
5. AYYUB, B. M. Elicitation of Input Weight and Importance: A General Framework. *Risk Analysis*, v. 21, n. 5, p. 915-932, 2001.
6. AVEN, T. Improving the foundation and practice of reliability engineering. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: *Journal of Risk and Reliability*, v. 231, n. 3, p. 295–305, 2017.
7. BAKIR, I. ; YILDIRIM, M. ; URSAVAS, E. An integrated optimization framework for multi-component predictive analytics in wind farm operations & maintenance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 138, 2021.
8. BARABADY, J.; KUMAR, U. Availability allocation through importance measures. *International Journal of Quality & Reliability Management*, v. 24, n. 6, p. 643–657, 2007.
9. BIRNBAUM, Z. W. On The Importance of Different Components in a Multicomponent System. Contract, 1968.
10. BIROLINI, A. Reliability Engineering: Theory and Practice. 8th ed. Berlin: Springer, 2017.
11. BUTTERWORTH, R. Some reliability fault-testing models. *Operations Research*, v. 20, p.335-343, 1972.
12. CRESWELL, J. W.; CLARK, V. L. P. Designing and Conducting Mixed Methods Research. Thousand Oaks, CA: Sage Publications, 2017.

13. CAUCHICK MIGUEL, P. A. Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. Elsevier, 2012.
14. CHALMERS. Comparative life cycle assessment of heat exchangers: Economic and environmental performance. 2016. Disponível em: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/248219.pdf>. Acesso em: 11 jun. 2024.
15. CHO, D. I.; PARLAR, M. A Survey of Maintenance Models for Multi-Unit Systems. *European Journal of Operational Research*, v. 51, n. 2, p. 1-23, 1991.
16. CULLEN, William Douglas. The Public Inquiry into the Piper Alpha Disaster. London: HMSO, 1990.
17. DAEMI, T.; EBRAHIMI, A. Evaluation of Components Reliability Importance Measures of Electric Transmission Systems Using the Bayesian Network. *Electric Power Components and Systems*, v. 40, n. 12, p. 1377-1389, 2012
18. DIAS, A. Metodologia para análise da confiabilidade em freios pneumáticos automotivos. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1996.
19. DUI, H.; SI, S.; YAM, R. C. M. A cost-based integrated importance measure of system components for preventive maintenance. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, p. 98–104, 2017.
20. ECONOMIDES, Michael J.; HILL, A. Daniel; EHLIG-ECONOMIDES, Christine. Petroleum Production Systems. 1st ed. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.
21. ELSAYED, E. System reliability engineering. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Longman, 1996.
22. ESPIRITU, J. F.; COIT, D. W.; PRAKASH, U. Component criticality importance measures for the power industry. *Electric Power Systems Research*, v. 77, p. 407-420, 2007.
23. FOGLIATTO, Flávio Sanson; RIBEIRO, José Luis Duarte. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
24. FURTADO, Antonio Mendes. Manuseio do petróleo em FPSO desde a captação à transferência para o navio aliviador. Rio de Janeiro: Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Marinha do Brasil, 2011.

25. GAO, X.; BARABADY, J.; MARKESET, T. Criticality analysis of a production facility using cost importance measures. *International Journal of Systems Assurance Engineering and Management*, v. 1, n. 1, p. 17–23, 2010.
26. GIL, A. Como elaborar projetos de pesquisa. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
27. GUERRA, O.; TEIXEIRA, F. Da oferta de sistemas complexos de produção para o suprimento de serviços e sistemas integrados: uma trajetória evolutiva. ANPEC, 2001.
28. HEALTH AND SAFETY EXECUTIVE (HSE). Offshore Installations (Offshore Safety Directive) (Safety Case etc.) Regulations 2015. London: HSE, 2015.
29. INDUSTRY TODAY. Chemical Industry: Preventive Maintenance & Reliability. Industry Today, 2021. Disponível em: <https://industrytoday.com/chemical-industry-preventive-maintenance-reliability/>. Acesso em: 13 jul. 2024.
30. JORDÃO, D.M.; FRANCO, L.R. Curso de formação de operadores de refinaria: prevenção contra explosões e outros riscos. Curitiba: PETROBRAS e UnicenP, 2002.
31. KUO, Way; ZHU, Xiaoyan. Importance Measures in Reliability, Risk, and Optimization: Principles and Applications. 1. ed. Hoboken: Wiley, 2012.
32. KELLY, Anthony. Strategic Maintenance Planning. 1st ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.
33. LEMOS, Lucelio de Oliveira. Tipos de manutenção, aplicações e tendências. Disponível em <http://pt.slideshare.net/luceliolemos/manuteno-37532661>. 2014. Acesso em: 10 nov. 2023.
34. MARCONI, Marina de Andrade; LAKATOS, Eva Maria. Fundamentos de metodologia científica. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.
35. MARSARO, M.F.; CAVALCANTE, C.A.V. Random preventive maintenance policy based on inspection for a multicomponent system using simulation. *Eksplotacja i Niezawodnosc – Maintenance and Reliability*; v.19, n. 4, p. 552–559, 2017.
36. MENG, H.; KLOUL, L.; RAUZY, A. Production availability modelling of FPSO system using stochastic Petri nets. *Safety and Reliability of Complex Engineered Systems*, p. 2271–2279, 2015.
37. MODARRES, M. Risk Analysis in Engineering: Techniques, Tools, and Trends. Boca Raton: CRC Press, 2016.

38. MÜLLER-LEONHARDT, A., MITCHELL, S. G., VOGT, J., SCHÜRMANN, T. Critical Incident Stress Management (CISM) in complex systems: Cultural adaptation and safety impacts in healthcare. *Accident Analysis and Prevention*, v. 68, p. 172–180, 2014
39. NICOLAI, R. P.; DEKKER, R. Optimal maintenance of multi-component systems: a review. Complex System Maintenance Handbook. Springer Series in Reliability Engineering. p. 263–286, 2008
40. ORTIZ NETO, J. B., COSTA, A. J. D. A Petrobrás e a exploração de Petróleo Offshore no Brasil: um approach evolucionário. *Revista Brasileira de Economia*, Rio de Janeiro, v. 61, n. 1, p. 95–109, Jan-Mar 2007.
41. Pratical User Guide – FITradeoff, 2023. Disponível em: <https://FITradeoff.org/wp-content/uploads/2024/04/User-guide-FITradeoff-web-5.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2024.
42. Programa de Descomissionamento de Instalações da Plataforma P-32. Petrobras, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/exploracao-e-producao-de-oleo-e-gas/seguranca-operacional/arq/ppdi/pdi-fpsos-p-32.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2023.
43. RAMPAZZO, Fabiano. Definição e Funcionamento do FPSO. Universidade de São Paulo, 2022.
44. SILVA, Anderson Bezerra da. Modelo de decisão multicritério para priorização de componentes críticos através de medidas de importância. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.
45. STOICHEVSKI, W. FPSOs: o novo modelo de negócios. Offshore Engineer, 2020. Disponível em: <https://pt.oedigital.com/news/fpsos-novo-modelo-neg%C3%B3cios-292511>. Acesso em: 20 dez. 2023.
46. THOMAS, L. A survey of maintenance and replacement models for maintainability and reliability of multi-item systems, *Reliability Engineering*, v. 16, p. 297–309, 1986.
47. VESELY, W. E.; DAVIS, T. C. Two Measures of Risk Importance and Their Application. *Nuclear Technology*, v. 68, n. 2, p. 226–234, 1985.
48. WANG, W.; PHAM, H.; ZUO, M. J. A review of maintenance policies for deteriorating single-unit systems. *European Journal of Operational Research*, v. 193, n. 2, p. 425-429, 2009.

49. WU, S. et al. Linking component importance to optimisation of preventive maintenance policy. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 146, p. 26-32. 2016.
50. WU, S.; COOLEN, F. P. A. A cost-based importance measure for system components: An extension of the Birnbaum importance. *European Journal of Operational Research*, v. 225, n. 1, p. 189–195, 2013.
51. ZHENG, H.; PAIVA, A.; GURCIULLO, C. Advancing from Predictive Maintenance to Intelligent Maintenance with AI and IIoT. 2020.