



Bruna Cristina Siqueira Kaiser

**Framework de apoio à decisão para avaliação de
criticidade de ativos: Uma abordagem fuzzy-
multicritério**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado

Coorientador: Prof. Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo

Rio de Janeiro
fevereiro de 2024



Bruna Cristina Siqueira Kaiser

Framework de apoio à decisão para avaliação de criticidade de ativos: Uma abordagem fuzzy-multicritério

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo

Coorientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Renan Silva Santos

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Gilson Brito Alves Lima

UFF

Prof. Cristina Gomes de Souza

CEFET-RJ

Rio de Janeiro, 22 de fevereiro de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, da autora e do orientador.

Bruna Kaiser

Graduou-se em Engenharia de Produção pelo CEFET-RJ (Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca). Atuou como pesquisadora no Instituto Tecgraf, entre os anos de 2021 e 2024, onde atuou em projetos para desenvolvimento de software para gestão de Inspeção e Manutenção de ativos Offshore.

Ficha Catalográfica

Kaiser, Bruna Cristina Siqueira

Framework de apoio à decisão para avaliação de criticidade de ativos : uma abordagem fuzzy-multicritério / Bruna Cristina Siqueira Kaiser ; orientador: Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado ; coorientador: Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do Carmo. – 2024.

109 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)—Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2024.
Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Gestão da manutenção. 3. Lógica fuzzy. 4. Métodos de apoio multicritério a decisão (MCDM). 5. Indústria offshore. 6. Criticidade. I. Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão. II. Carmo, Luiz Felipe Roris Rodriguez Scavarda do. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

À minha amada filha Angelina, alegria do meu
viver, cuja simples razão de existência, me faz
querer ser melhor todos os dias.

Agradecimentos

Meu primeiro agradecimento é para Àquele a quem pertenço, Jesus, o Cristo. Em Ti todas as coisas me são possíveis. Obrigada pelo ordinário e pelo extraordinário, és o dono das minhas afeições, te amo.

Dedico um agradecimento especial ao meu esposo, Fabio, e minha mãe Dolores, que estiveram de perto comigo, permitindo que eu concluísse essa pesquisa mesmo após o nascimento da minha bebê. Nunca esquecerei o que fizeram por mim, sem vocês eu não conseguiria.

Agradeço ao meu esposo, meu companheiro, aquele que não me faltou nos momentos mais adversos, como eu te amo, obrigada por todo seu apoio. Agradeço a minha princesinha Angelina, por ser meu combustível diário, te amo filha. Agradeço aos meus pais , Dolores e Luciano por me instruírem no caminho da persistência. Obrigada por me amarem sem reservas e por me apoiarem sempre e em tudo. Agradeço à minha irmã Joice, de quem não me faltaram palavras de incentivo, te amo.

Agradeço à minha equipe de pesquisa do Instituto Tecgraf, que me receberam com entusiasmo. Agradeço especialmente à Marina, Fernanda e Rodrigo pela partilha do conhecimento com maestria e paciência, vocês me inspiram. Um agradecimento especial também ao meu gerente Eduardo Thadeu.

Agradeço, também, à PUC-Rio pela educação de qualidade e aos meus amigos Felipe Piancó e Lia Piovesan, que sempre se mostraram disponíveis para partilharem as delícias e dores da pesquisa acadêmica.

Agradeço ao meu orientador, Rodrigo Caiado, pelo incentivo constante e pela partilha valiosa de conhecimento que me orientou ao longo da elaboração desta pesquisa. Também quero reconhecer meu co-orientador, Luiz Felipe Scavarda, pelas contribuições essenciais a este trabalho. Sua experiência foi um valioso complemento para o desenvolvimento dessa pesquisa. Vocês desempenham um papel fundamental na minha jornada acadêmica. Agradeço também ao professor Renan Silva que sempre esteve disponível para dar instruções preciosas para dar prosseguimento a essa pesquisa.

Por fim, gostaria de expressar meu agradecimento aos mestres que marcaram minha vida, Rodrigo Peres e Alúcio Monteiro, que me incentivaram à jornada acadêmica, muito obrigada.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Kaiser, Bruna Cristina Siqueira; Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão (Orientador); Scavarda, Luiz Felipe Roris Rodriguez do Carmo. **Framework de apoio à decisão para avaliação de criticidade de ativos: Uma abordagem fuzzy-multicritério.** Rio de Janeiro, 2024. 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Cenários de falhas em plataformas offshore constituem riscos ambientais, sociais e econômicos significativos devido à amplitude dos danos que podem ser provocados. Portanto, neste contexto, a adoção de boas práticas de gestão de manutenção é necessária, permitindo a continuidade operacional, através da integridade de ativos. No entanto, há ainda uma necessidade de estudos com uma abordagem holística para uma avaliação multinível de ativos, através de abordagens modernas que mitiguem as limitações da análise de modos e efeitos de falha (FMEA) tradicional. Desse modo, esta pesquisa propõe um framework para a análise FMEA que considera a subjetividade e as importâncias relativas dos critérios de risco, através de uma abordagem integrada que utiliza sistemas hierárquicos de inferência e modelos multicritério, como o *Best-Worst Method* (BWM) e o fuzzy *VIsekriterijumsko KOMpromisno Rangiranje* (VIKOR) para fornecer uma classificação estruturada de ativos, orientando o gestor na priorização de manutenção. Esse framework foi validado por meio de um estudo empírico em uma plataforma do tipo *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), que abordou a problemática da corrosão externa para gestão de manutenção, com base na coleta de dados triangulados. Portanto, a presente pesquisa traz contribuições teóricas ao preencher lacunas através da propositura e aplicação de metodologias integradas, e contribuições práticas ao fornecer aos gestores, responsáveis pela formulação de planos de manutenção, elementos objetivos para uma tomada de decisão mais eficaz, sob o paradigma da confiabilidade. Esse framework pode ser aplicado em outros domínios através do ajuste de critérios avaliativos.

Palavras-chave

Gestão da manutenção; Lógica fuzzy; Métodos de apoio multicritério a decisão (MCDM); Indústria Offshore; Criticidade.

Abstract

Kaiser, Bruna Cristina Siqueira; Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão (Advisor); Scavarda, Luiz Felipe Roris Rodriguez do Carmo (Co-advisor). **Decision support framework for asset criticality assessment: A fuzzy-multicriteria approach.** Rio de Janeiro, 2024. 109p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Failure scenarios in offshore platforms pose significant environmental, social, and economic risks due to the magnitude of potential damages they can cause. Therefore, in this context, the adoption of good maintenance management practices is necessary, enabling operational continuity through asset integrity. However, there is still a need for studies with a holistic approach for a multi-level assessment of assets, using modern approaches to mitigate the limitations of traditional Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Thus, this research proposes a framework for FMEA that considers the subjectivity and relative importance of risk criteria, through an integrated approach using hierarchical inference systems and multi-criteria models such as the Best-Worst Method (BWM) and fuzzy VIsekriterijumsko KOmpromisno Rangiranje (VIKOR) to provide a structured classification of assets, guiding managers in maintenance prioritization. This framework was validated through an empirical study on a Floating Production Storage and Offloading (FPSO) platform, addressing the issue of external corrosion for maintenance management, based on triangulated data collection. Therefore, this research brings theoretical contributions by filling gaps through the proposal and application of integrated methodologies, and practical contributions by providing managers responsible for formulating maintenance plans with objective elements for more effective decision-making under the reliability paradigm. This framework can be applied in other domains by adjusting evaluative criteria.

Keywords

Maintenance management; Fuzzy logic; Multiple-criteria decision analysis (MCDM) methods; Offshore industry; Criticality.

Sumário

1.	Introdução	13
2.	Referencial Teórico	17
2.1.	Gestão da Corrosão	17
2.1.1.	Gestão da Corrosão na indústria de O&G	18
2.2.	Gestão da Manutenção	19
2.2.1.	Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)	20
2.3.	Análise de modos de falha e efeitos (FMEA)	23
2.4.	Teoria dos conjuntos fuzzy	25
2.4.1.	Lógica fuzzy	26
2.4.2.	Variável fuzzy	26
2.4.3.	Regras fuzzy	27
2.4.4.	Sistema de Inferência Fuzzy (SIF)	28
2.4.5.	Sistema hierárquico de inferência fuzzy (HSIF)	31
2.5.	Método Best- Worst (BWM)	32
2.6.	Método fuzzy VIKOR	36
3.	Metodologia de Pesquisa	39
3.1.	Design science research (DSR)	39
3.2.	Proposta de artefato	40
3.2.1.	Seleção e descrição dos ativos	41

3.2.2. Avaliação de ativos	42
3.2.2.1. Seleção e classificação de critérios avaliativos	43
3.2.2.2. Avaliação dos ativos com base nas análises dos critérios	44
4. Estudo empírico	47
4.1. Seleção e classificação dos fatores de corrosão	51
4.1.1. Seleção da literatura e de documentos técnicos	51
4.1.2. Seleção com especialistas (Entrevistas)	53
4.1.3. Classificação de fatores	54
4.2. Construção do ambiente de análise HFIS	61
4.2.1. Resultados dos HFIS dos parâmetros S,O e D	67
4.3. Definição dos pesos dos critérios	69
4.4. Determinação do desempenho dos ativos para os parâmetros	77
4.5. Classificação final	82
5. Conclusões e considerações finais	87
6. Referências bibliográficas	89

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema Inferencial Fuzzy proposto por Mamdani (1975)	28
Figura 2 – Equivalência de um FIS clássico para um FIS hierárquico	31
Figura 3 - Macro etapas da pesquisa para construção do framework prático	41
Figura 4 - Framework prático proposto para seleção e avaliação de ativos	48
Figura 5 - Ilustração da subdivisão de uma unidade FPSO	49
Figura 6 - Representação de um sistema TVF	50
Figura 7 - Conjunto fuzzy triangular para a variável de saída (Detecção)	63
Figura 8 -HFIS do parâmetro Severidade	64
Figura 9 - HFIS do parâmetro Ocorrência	64
Figura 10 - HFIS do parâmetro Detecção	65
Figura 11 - Exemplificação do bloco de regras	66
Figura 12 - Fatores multiníveis de avaliação de TVF	70
Figura 13 - HFIS para classificação de risco final	83
Figura 14 -Diagrama PRISMA	102

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Proposta de estruturação das informações referente à seleção de ativos	42
Tabela 2 - Número de subconjuntos contidos em cada ativo TVF	51
Tabela 3 – Informações atinentes ao subsistema conforme lei de formação	51
Tabela 4 -Fatores de risco associados à corrosão	52
Tabela 5 – Informações demográficas dos participantes entrevistados	53
Tabela 6 – Novos fatores apontados por especialistas	54
Tabela 7 -Fatores selecionados para avaliação de criticidade dos sistemas TVF	56
Tabela 8 - Variáveis de entrada e saída dos ambientes FIS projetados	61
Tabela 9 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro severidade	62
Tabela 10 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro ocorrência	62
Tabela 11 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro detecção	63
Tabela 12 - Classificações de conjuntos TVF para o parâmetro O	67
Tabela 13 - Classificação dos ativos TVFs para o parâmetro O	68
Tabela 14- Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha S	70
Tabela 15 - Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha O	71
Tabela 16 - Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha D	72
Tabela 17 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Severidade	73
Tabela 18 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Ocorrência	73
Tabela 19 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Detecção	73
Tabela 20 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Severidade	74
Tabela 21 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Ocorrência	74
Tabela 22 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Detecção	74
Tabela 23 - Pesos globais dos critérios de decisão	75
Tabela 24 – Resumo das razões de consistências	75
Tabela 25 - Matriz Desempenho x Peso dos critérios de avaliação (S)	76

Tabela 26 - Alternativas do parâmetro Severidade	77
Tabela 27 - Alternativas do parâmetro Ocorrência	78
Tabela 28 - Alternativas do parâmetro Detecção	78
Tabela 29 - Matriz de performance para o parâmetro Severidade	79
Tabela 30 - Matriz de performance para o parâmetro Ocorrência	79
Tabela 31 - Matriz de performance para o parâmetro Detecção	80
Tabela 32 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (S)	80
Tabela 33 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (O)	80
Tabela 34 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (D)	80
Tabela 35 - Desempenho geral dos ativos estratificado pelos parâmetros S, O e D.	81
Tabela 36 - Desempenho final dos sistemas TVFs.	83
Tabela 37 - Comparação das classificações nível e multinível	85
Tabela 38 -Classificação de risco dos tipos de fluidos	105
Tabela 39 - Ordenação da criticidade de materiais	106
Tabela 40 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme cobertura	107
Tabela 41 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme isolamento	107
Tabela 42 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme temperatura	108
Tabela 43 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme pressão	108
Tabela 44 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme número de conexões	108
Tabela 45 - Criticidade dos ativos conforme presença/ausência de itens soldados	109
Tabela 46 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme dificuldade de acesso	109
Tabela 47 - Criticidade dos ativos conforme faixas de número de curvas	109

1. Introdução

A indústria de óleo e gás (O&G) mostra-se relevante em cenários locais e mundiais, em virtude dos expressivos valores que movimenta. Em 2019, o setor movimentou somente nos EUA, US\$1,7 trilhões (PWC, 2021), enquanto que em 2022, numa projeção global, estimou-se que esse setor movimentou US\$5 trilhões (IBISWORLD, 2022). Além disso, essa indústria é responsável pela geração de milhares empregos (PWC, 2021), inovação tecnológica (HU; BAO; HU, 2013), além exercer um papel crucial em cadeias de suprimento de outros setores, como o energético (GHAITHAN; ATTIA; DUFFUAA, 2017) e o químico (ADKINS et al., 2010), por exemplo.

Dentro desse contexto, destaca-se que embora haja a ascensão de outras fontes de energia, o petróleo, principal produto da indústria de O&G, ainda figura como a maior fonte de energia global, impondo-se como um recurso estratégico para o desenvolvimento econômico e social (LIU et al., 2020). Esse cenário indica, portanto, a importância de uma atuação diligente de todos os stakeholders envolvidos na cadeia de processamento do petróleo, cujos macroprocessos globais resumem-se em: exploração, extração, refino, transporte e comercialização (CHIMA, 2007; NEGI; VERMA; SINGH, 2021; SILVA et al., 2014).

Em virtude da natureza desses processos, bem como suas respectivas abrangências, além de atenderem a finalidades próprias da indústria, tangenciam temáticas importantes como as políticas, econômicas, técnicas e científicas (KABIR; SADIQ; TEFAMARIAM, 2016). Para viabilizá-los é demandado que haja uma mobilização extensiva de ativos, sendo um dos mais proeminentes os diversos tipos de plataformas *Offshore*, cujas funções são desempenhadas nos mares e costas de inúmeros países do globo (NI et al., 2022).

Plataformas *offshore* são sistemas técnicos de natureza complexa, uma vez que a finalidade de suas operações é alcançada a partir da conjunção do desempenho das atividades de uma miríade de componentes que as constituem (PANENKA et al., 2020; RATNAYAKE, 2014). Desse modo, para o funcionamento pleno deste sistema, é crucial que haja rotinas bem definidas dentro do escopo de gerenciamento de ativos com a finalidade de garantir a integridade dos mesmos, tendo em vista que se comprometida gera o potencial de causar impactos negativos em diversas frentes, com destaque para saúde e segurança, aspectos ambientais e rotinas operacionais (KABIR; SADIQ; TEFAMARIAM, 2016; MOAN, 2005; OKE et al., 2006).

De acordo com a pesquisa desenvolvida por Amadi-Echendu et al. (2010) o gerenciamento de ativos tem duas dimensões, a primeira relacionada à preservação da integridade e a segunda refere-se à dimensão financeira, convergindo, sobretudo dois aspectos, quais sejam: o gerenciamento do ciclo de vida e os objetivos de negócio (VANDER LEI; HERDER; WIJNIA, 2012). O gerenciamento de ativos, portanto, na dimensão da preservação da integridade, pode ser definido como uma sistemática cuja centralidade está na manutenção e operação de ativos físicos (JASIULEWICZ-KACZMAREK; GOLA, 2019), com vistas a garantir a produtividade do mesmo. Complementarmente, considerando o viés financeiro, (PETCHROMPO; PARLIKAD, 2019) indicam que a gestão de ativos é uma atividade integrada que objetiva obter valor a partir dos ativos, ou seja, além de garantir a confiabilidade do sistema e redução de custos, oferta benefícios para a organização e seus respectivos stakeholders.

Considerando, pois, que os ativos mobilizados para as atividades *offshore* são projetados para uma vida útil entre 20 e 30 anos (ANIMAH; SHAFIEE, 2018) e, durante esse período os mesmos são submetidos a condições operacionais intensas, medidas regulatórias rígidas e a ambientes adversos, o gerenciamento de ativos mostra-se necessário para a garantia da integridade com a observância dos objetivos econômicos. Segundo (NIXON; PENA, 2019), a gestão de ativos *offshore* tem evoluído de forma considerável ao longo dos anos, em virtude da ascensão tecnológica e, atualmente, é reconhecida por promover disponibilidade, utilização e retorno sobre o capital desses ativos.

Nessa seara, a gestão da manutenção desempenha uma função significativa uma vez que se relaciona com a garantia da integridade de ativos, conforme supramencionado. Ações de manutenção, tradicionalmente, designam conjunções de atividades técnicas, administrativas e gerenciais, com vistas a alcançar a restauração de um item ou sistema a um estado em que haja o desempenho de sua função requerida, de maneira econômica e segura (AYU; YUNUSA-KALTUNGO, 2020). A gestão da manutenção, portanto, ultrapassa o limite do caráter reparativo e fornece para a organização, além da garantia do desempenho das funções dos equipamentos (GARCÍA MÁRQUEZ et al., 2012), competitividade.

Alguns autores (JASIULEWICZ-KACZMAREK; GOLA, 2019; SWANSON, 2001) convergem ao destacar que as organizações, para alcançar um desempenho ótimo, miram em melhorias de produtividade e redução de custos e, nessa seara, a função manutenção desempenha um papel fundamental, pois possui a prerrogativa de gerar valor organizacional. A depender da indústria analisada, a gestão da manutenção pode ter enfoques distintos, podendo abranger diferentes subsistemáticas de gestão. Na indústria

analisada, em virtude da vulnerabilidade de seus ativos aos fenômenos corrosivos, a gestão da corrosão mostra-se crucial.

Nas estruturas *Offshore*, como plataformas, os fenômenos corrosivos de natureza interna e externa são frequentemente observados em virtude do ambiente agressivo em que estão localizadas, sujeitas, por exemplo, a altas pressões e altas temperaturas (OLAJIRE, 2017). Em virtude disso, a presença de corrosões nesses ativos, podem promover consequências diversas, como fraturas, rupturas, fadiga, perda de resistência (MAHMOODZADEH et al., 2020), incorrendo em modos de falha. Estes, por sua vez, podem apresentar impactos negativos como mau desempenho da operação, redução dos níveis de segurança e minimização de vida útil (MISHRA; KESHAVARZZADEH; NOSHADRAVAN, 2019).

Em cenários desafiadores, como esse descrito, os ativos precisam ser gerenciados de uma maneira holística, tal qual o programa de manutenção centrada na confiabilidade, em inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM), designam. O RCM é projetado para assegurar as capacidades inerentes à confiabilidade dos equipamentos (STANLEY; HOWARD F., 1978). Dentro do universo dessa abordagem, há métodos de diversas naturezas que são utilizados de modo individual ou combinados para classificar os ativos, quais sejam: qualitativos, sem quantitativos e quantitativos. Essa classificação, em caráter geral, é feita considerando concomitantemente o risco de falha e sua potencial consequência.

A ferramenta denominada análise de modo e efeito de falha (FMEA), do inglês *failure mode and effects analysis*, é a técnica central num programa de RCM (GUPTA; MISHRA, 2017), uma vez que é utilizada para identificar e eliminar falhas (conhecidas ou potenciais) para aumentar a confiabilidade e segurança de sistemas complexos (LIU et al., 2013). Embora o FMEA seja uma técnica eficaz para avaliação de riscos, existem críticas endereçadas à mesma, como a falta de precisão para a avaliação de fatores de risco e a problemática do cálculo do número de prioridade de risco (RPN), mostrando-se, portanto, pouco representativa para endereçar questões relativas aos casos reais (LIU; LIU; LIU, 2013b).

Diante disso, observou-se uma série de produções acadêmicas que evidenciaram os esforços para mitigar as limitações do FMEA. (LIU; LIU; LIU, 2013a), em uma revisão sistemática, listaram que os métodos descritos na literatura para melhorar o processo de análise de criticidade da ferramenta FMEA podem ser agrupados em modelos de apoio multicritério à decisão (MCDM), programação matemática (MP), inteligência artificial (IA) e abordagens integradas. Embora haja uma robusta contribuição acadêmica de modelos que

permeiam esses agrupamentos, ainda há uma demanda de propositura de modelos integrados que inovem na mitigação das limitações do FMEA.

Além disso, no que se refere à indústria de Óleo e Gás (O&G), dentro do bojo da temática de criticidade, existe uma ausência de estudos que abordem à questão de criticidade de ativos, analisando-os sob uma perspectiva multinível. Ni et al. (2022) destacaram a existência de uma necessidade de estudos que abordem a questão da identificação de risco considerando uma abordagem multinível, ou seja, avaliando o ativo em sua inteireza (considerando-o como um sistema) e sua subdivisão em um nível inferior, que seria uma análise de subsistema. Em linha a essa propositura, Rios (2023) reafirma a importância de se desenvolverem estudos em nível de subsistemas, ou seja, subdividindo um sistema em partes menores para avaliar a criticidade do mesmo, a partir da agregação dos resultados. Essa sistemática, segundo a autora, possibilitará avaliar as contribuições de cada um desses componentes para a criticidade total do sistema e, então, proporcionar uma melhor compreensão das prioridades de manutenção. Portanto, a presente pesquisa é orientada pela seguinte pergunta: *“De que forma uma equipe de gestão de manutenção pode compor a carteira de ativos para as rotinas de inspeção e manutenção considerando os paradigmas de criticidade multiníveis?”*.

Portanto, a presente pesquisa apresenta um novo framework para a análise de modos e efeitos de falha, que se baseia em métodos formais de pesquisa, balizados pelo design science research. Esse framework prático aborda a subjetividade e as importâncias relativas dos fatores de risco, através de uma abordagem integrada que utiliza sistemas hierárquicos de inferência e modelos multicritério, como o BWM (Best-Worst Method) e o fuzzy VIKOR (VIsekriterijumsko KOMpromisno Rangiranje) para calcular os números de prioridade de risco a partir das avaliações e sínteses dos julgamentos dos especialistas. Essa abordagem é aplicável ao processo de seleção de ativos, proporcionando uma garantia de rigor técnico e científico ao desenvolvimento do FMEA. São fornecidos um estudo empírico e uma análise comparativa para o contexto offshore, a fim de abordar a questão da corrosão externa para gestão de manutenção.

Em relação à organização da pesquisa, o capítulo 2 é dedicado à construção da fundamentação teórica, no qual são apresentados todos os conceitos centrais necessários para a construção deste estudo. O capítulo 3 é reservado aos aspectos metodológicos, cuja centralidade é a construção do framework envolvendo as diretrizes do RCM, FMEA, HSIF e métodos BWM e fuzzy VIKOR. O capítulo 4, por sua vez, delimita o estudo empírico trazendo os elementos constitutivos e apresenta os resultados do framework. Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e as considerações finais do estudo empreendido.

2. Referencial Teórico

Esta seção compreende o conteúdo atinente aos temas que fundamentam a presente pesquisa, cada qual será apresentado de maneira isolada e integrada, buscando abordar também o que se tem produzido na academia a respeito dos mesmos. Dentre os tópicos abordados, destacam-se: gestão da corrosão, gestão da manutenção, manutenção centrada na confiabilidade (RCM), ferramenta FMEA, gestão da corrosão e apoio multicritério à decisão.

2.1. Gestão da Corrosão

De acordo com Koch (2017) a gestão da corrosão, em sentido amplo, compreende a prevenção da corrosão e o reparo ou substituição de ativos decorrentes dos danos ocasionados por ela, a partir das macroatividades de inspeção e manutenção que compreendem todo o ciclo de vida do ativo. De modo similar, Groysman (2017) contribuiu destacando que o gerenciamento de corrosão inclui ações de determinação do risco de corrosão, seleção de materiais, proteção contra corrosão e métodos de monitoramento e que seu objetivo último não é alcançar uma taxa de corrosão zero, mas atingir taxas de corrosão aceitáveis dentro dos limites operacionais estabelecidos.

Para Mishra et al. (2019), a corrosão, de modo amplo, pode ser definida como um fenômeno físico-químico complexo, possibilitado pela convergência de diversos fatores, como condições ambientais, climáticas e características/composições do material, dentre outros. Em termos de processo, Popoola et al. (2013) descreve que a corrosão é composta por três elementos: um ânodo, um cátodo e um eletrólito. O ânodo é o local onde ocorre a corrosão, o eletrólito é o meio corrosivo, que permite a transferência de elétrons do ânodo para o cátodo, e o cátodo forma o condutor elétrico na célula que não é consumido no processo de corrosão.

Os possíveis danos advindos da corrosão podem ser resumidos em fraturas, problemas de cobertura, falha de soldas e deformações (ABBAS; SHAFIEE, 2020a; ANIMAH; SHAFIEE, 2018; MAHMOODZADEH et al., 2020). (STANLEY; HOWARD, 1978) já preconizavam que os sistemas, considerando cada uma de suas partes mecânicas, estão sujeitos às ações corrosivas e, estas por sua vez, resultam em desvios das condições de seu funcionamento original, que podem levar a cenários de falha. Desse modo, pode-se esboçar

a seguinte sequência lógica: fatores de influência levam ao processo corrosivo, este, por sua vez, gera mecanismos de degradação (danos) que podem materializar modos de falha, os quais designam consequências diversas como paradas não programadas e acidentes, por exemplo.

2.1.1. Gestão da Corrosão na indústria de O&G

No cenário offshore, considerando que a corrosão é a forma mais proeminente de dano devido à combinação de materiais metálicos expostos a um ambiente agressivo (JURIŠIĆ; PARUNOV; GARBATOV, 2017), a gestão da corrosão desempenha um papel salutar dentro do contexto de gestão da manutenção. Kere e Huang (2019) destacaram, ainda, que a corrosão, em virtude da conjuntura anteriormente apresentada, pode impactar de modo negativo sistemas técnicos complexos, como as plataformas (PANENKA et al., 2020), deixando-os mais vulneráveis a riscos naturais e mais demandantes de ações de reparo.

Javaherdashti (2000) destaca que não é possível cessar os mecanismos corrosivos, mas sim mitigar a gravidade de suas ações no material, por meio de métodos baseados em tecnologia e métodos baseados em gestão, consistindo, então, no objetivo precípua das ações que compreendem uma gestão da corrosão efetiva. Essas contribuições, portanto, ratificam a importância deste tipo de gestão, tendo em vista que a presença da corrosão pode gerar mecanismos de redução da confiabilidade, resistência e durabilidade do ativo, delineando, assim, cenários de falha, que a depender do componente afetado, pode leva

r a graves consequências em múltiplas dimensões como as de saúde e segurança, meio ambiente e financeira (CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESET, 2010; KABIR; SADIQ; TEFAMARIAM, 2016).

Diante do exposto, verifica-se a importância do estabelecimento da gestão da corrosão dentro do contexto de gestão da manutenção para ativos *Offshore*. No entanto, outro fator destaca sua relevância, a representatividade de seus custos. Segundo Abbas e Shafiee (2020b), na indústria de O&G, os custos de manutenção representam entre 20% - 40% dos custos totais de operação. Considerando, pois, esse cenário, (PAILLUSSEAU et al., 2018) destacam que, nesse contexto, os custos de manutenção estão muito relacionados aos custos de gerenciamento da corrosão. Portanto, para endereçar os desafios observados nesse contexto, a política de manutenção proativa vem sendo muito utilizada (KHAZRAEI; DEUSE, 2011), na qual a abordagem de manutenção centrada na confiabilidade, em inglês *Reliability Centered Maintenance* (RCM) destaca-se, uma vez que promove a prevenção

sistemática de riscos de falhas (RATNAYAKE, 2014), priorizando a análise de subsistemas (ou unidades) com base nas falhas e suas respectivas consequências (IQBAL et al., 2017).

2.2. Gestão da Manutenção

A função manutenção pode ser definida como um processo estruturado com vistas à restauração da funcionalidade plena de um sistema (AHMAD; KAMARUDDIN, 2012). Esse processo, de acordo com (DEKKER, 1996) deve cumprir com alguns principais, quais sejam: i) garantir o funcionamento do sistema; ii) garantir a vida do sistema (durante o ciclo de vida planejado); iii) garantir a segurança (de pessoas e infraestrutura) e iv) garantir o bem-estar humano. Esse cenário, embora designe um viés operacional, inclui um caráter estratégico, uma vez que, a prática da gestão de manutenção constitui-se como um fator crucial para longevidade organizacional, contribuindo para a geração de lucro, tornando-a mais competitiva (FRASER; HVOLBY; TSENG., 2015).

Portanto, em virtude da mudança de paradigma gerencial, que reflete o cenário concorrencial que as organizações enfrentam (SANDU; VARGANOVA; SAMII, 2022) e, que, por conseguinte, demandam atuações que lhes confirmem vantagem competitiva, os paradigmas de manutenção se modificaram ao longo dos anos (IQBAL et al., 2017). Essas mudanças buscavam, sobretudo, melhorar as taxas de disponibilidade de equipamentos, diminuir as taxas de avarias, convergindo, assim, para uma maximização da vida útil dos mesmos e, em alguma instância, diminuir dos custos operacionais, que refletiriam melhores percentuais de lucro (ARENA et al., 2022). Acadêmicos traçaram uma linha temporal com as gerações de manutenção, cada qual designando um paradigma distinto do outro, que surgiram ao transcorrer das décadas, a saber: manutenção corretiva (1º Geração - 1940), manutenção preventiva (2º Geração - 1960), manutenção preditiva (3º Geração - 1980) e manutenção proativa (4º Geração - 2000) (IQBAL et al., 2017; KHAZRAEI; DEUSE, 2011).

A manutenção corretiva pode ser definida como um processo estruturado para identificar e corrigir as causas de falhas de um sistema reconhecidamente em estado de falha (WANG et al., 2014). O enfoque nesse tipo de manutenção é o de apenas restaurar o sistema à sua condição operacional inicial (HASHEMI; ASADI; ZAREZADEH, 2020), não pretendendo alcançar nenhum outro objetivo adicional. Na manutenção preventiva, por outro lado, as ações são operacionalizadas antes que o estado de falha seja estabelecido (AHMAD; KAMARUDDIN, 2012). Nesse caso, objetiva-se reduzir a probabilidade de

ocorrência de falhas por meio de ações periódicas, possibilitando, por consequência, um aumento da vida útil do sistema atendido (BASRI et al., 2017).

Por fim, a manutenção proativa, que surgiu em meio a um ambiente organizacional extremamente competitivo (BANGARI; NANGARE; AL MAZROUEI, 2019), consiste num paradigma de atuação diligente de caráter antecipatório em relação à falha, do mesmo modo que a manutenção preventiva, no entanto, suas ações são direcionadas com base no monitoramento da condição do ativo e na confiabilidade do mesmo (BASRI et al., 2017). Este tipo de manutenção identifica e gerencia as causas raízes de falhas, mediante uma atuação contínua que, além de prolongar a vida útil do ativo, evita desordens de grandes proporções instauradas em virtude das consequências potenciais das falhas (RAKYTA et al., 2016). A manutenção proativa para atingir esse fim, especializa-se em estratégias específicas, dentre as quais se citam as mais proeminentes, quais sejam: manutenção baseada em condições (CBM), manutenção centrada na confiabilidade (RCM), manutenção baseada em risco (RBM), manutenção baseada em tempo (TBM) e gerenciamento de manutenção auxiliado por computador e sistemas de informação (IQBAL et al., 2017; KHAZRAEI; DEUSE, 2011). Dentre essas estratégias, a RCM destaca-se como uma das mais utilizadas em aplicações industriais com vistas a aumentar a confiabilidade de seus ativos (GUPTA; MISHRA; SINGHVI, 2016; PIECHNICKI et al., 2021; SELVIK; AVEN, 2011).

2.2.1. Manutenção Centrada na Confiabilidade (RCM)

A manutenção centrada na confiabilidade surgiu na década de 1960, ainda de modo embrionário, na indústria aeronáutica americana, diante da problemática do aumento de custos relativos às práticas de manutenção no setor, os esforços iniciais convergiram aspectos-chave das temáticas de manutenção programada, confiabilidade, periodicidade das ações de manutenção e segurança (F. STANLEY; HOWARD F., 1978). Diante dessa conjuntura, essa nova abordagem foi considerada uma sistemática de implementação de estratégias de manutenção reativa e preventiva, baseada em condições, de caráter proativo (GUPTA; MISHRA, 2017). Como essa aplicação mostrou-se bem sucedida, tendo em vista os resultados satisfatórios que promoveu, muitas outras indústrias passaram a adotar essa estratégia e obter resultados semelhantes (EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION, 2009; MOUBRAY, 1997), destacando-a como uma das estratégias mais relevantes atualmente (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2015).

Catelani et al. (2020) contribuíram realizando um estudo cuja aplicação da RCM no setor energético, mais precisamente com aerogeradores onshore, possibilitou uma gestão de

manutenção eficiente, orientada a dados, que a um só tempo mostrou-se útil para orientar a tomada de decisão e garantir a confiabilidade dos ativos analisados. Igder et al. (2021), por sua vez, utilizaram-se do paradigma de RCM para promover, de modo sistemático, uma melhor seleção de tarefas de manutenção para um sistema de energia de um navio elétrico (setor naval), com vistas a melhorar a confiabilidade e a segurança relativa ao sistema. Integraram para isso o uso de ferramentas de natureza quantitativa e qualitativa, a saber: processo de markov e o algoritmo *Enhanced Jaya*, além de uma técnica de gerenciamento de risco denominada *Layers of Protection Analysis (LOPA)*.

Para mitigar a problemática de obtenção das taxas de falhas dos equipamentos, a qual é uma entrada importante para a RCM, Braglia et al. (2020) associaram técnicas avançadas de análise de dados ao framework de sua aplicação para estimar essas supracitadas taxas no contexto de uma refinaria de petróleo (setor de O&G). Essa aplicação mostrou-se satisfatória, atingindo uma taxa acima dos 90% para o objetivo proposto, trazendo como única ressalva para aplicações posteriores a necessidade de um *dataset* grande e rico (sem *missing values* e erros). Diante da mesma problemática, a de obtenção de dados, Prasetyo e Mercado Rosita, (2020) aplicaram o RCM, após a condução de uma revisão sistemática da literatura, na indústria manufatureira, a fim de otimizar a confiabilidade das máquinas.

Em face do exposto, a RCM tem a sua importância confirmada à medida que fornece materialidade para não apenas manter ativos em funcionamento, indiscriminadamente, ou seja, sem considerar as diferenças que existem entre eles, mas considerando os seus respectivos contextos operativos (MOUBRAY, 1997). Nesse sentido, Gupta e Mishra (2017) apontam que a manutenção centrada na confiabilidade consiste numa abordagem estruturada e prática que avalia os componentes de cada sistema, de modo a ofertar-lhes as estratégias de manutenção mais aderentes às necessidades reais da operação. Semelhantemente, (Geisbush e Ariaratnam (2022) contribuíram ao descreverem que a manutenção centrada na confiabilidade é um processo que determina quais atividades devem ser realizadas para garantir o desempenho do ativo, através da identificação de sua função e de seus respectivos modos de falha, com vistas a determinar as tarefas de manutenção mais econômicas e eficientes para reduzir a probabilidade de falha associada.

Essas enunciações mostram-se pertinentes, pois, conforme as práticas gerenciais foram se modernizando, ficou claro que não há uma única solução de manutenção que atenda todos os sistemas em questão (LÓPEZ-CAMPOS; CRESPO MÁRQUEZ; GÓMEZ FERNÁNDEZ, 2013), pois cada qual possui especificidades distintas que caracterizam modos de falhas diferentes. Portanto, os objetivos centrais da RCM são: (i) determinar o programa de manutenção ideal com menor risco e impacto devido à falha; (ii) otimizar os

esforços de manutenção por meio do foco na função crítica do equipamento/sistema, evitando, assim, ações de manutenção que sejam desnecessárias ou não sejam mais eficazes (AZID et al., 2019; SAJARADJ; HUDA; SINULINGGA, 2019) e, por fim, (iii) aumentar a tarefa de manutenção que se refere a falhas ou históricos de reparo (SAJARADJ; HUDA; SINULINGGA, 2019).

Além da importância operacional de se manter o funcionamento do ativo considerando seu contexto, a RCM agrega outros aspectos relevantes para a organização. (POURAHMADI; FOTUHI-FIRUZABAD; DEHGHANIAN, 2017) aponta que a RCM constitui-se numa estratégia econômica, uma vez que considera, de maneira conjunta, requisitos de custo e confiabilidade. Neste sentido, alguns estudos (ALRIFAEY et al., 2020; MARTORELL et al., 2010) destacam que ao selecionar as políticas ótimas aplicáveis aos sistemas candidatos à manutenção, a RCM garante confiabilidade e disponibilidade, considerando para isso parâmetros de custos. Azid et al. (2019) destacam que a RCM tem o condão de conferir maior segurança operacional e integridade ambiental, contribuindo também para uma aferição positiva nos indicadores de rentabilidade. Além dos aspectos de economicidade e confiabilidade, (MOUBRAY, 1997), um expoente da literatura clássica nessa temática, também destaca as reduções dos riscos.

Apesar desses benefícios que emergem da literatura sendo corroborados pelas indústrias que aplicam o RCM, há também alguns pontos que podem ser identificados como desvantagens. Alrifae et al. (2020) destacam que muitos especialistas consideram a abordagem extremamente qualitativa e demorada para por em prática todos os seus estágios. Ainda nesse contexto, Sillivant (2015) destaca como desvantagens que essa estratégia não é viável para todos os sistemas, além da economia, que é observada após a sua aplicação, não ser observada imediatamente devido ao alto custo (mobilização de pessoas e planejamento) para sua implementação. Apesar desses aspectos, a RCM ainda é amplamente aplicada (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2015).

A RCM configura-se, portanto, em uma metodologia estruturada, que possui uma sistemática de aplicação iterativa, que pode ser resumida nos seguintes passos (FUENTES-HUERTA et al., 2018; GUPTA; MISHRA; SINGHVI, 2016): (i) seleção de equipamentos e coleta de dados; (ii) definição das funções para identificar o item funcionalmente significativo dentro do sistema; (iii) identificação e definição dos modos de falha, seguido da descrição de suas respectivas consequências, nesse caso o FMEA é a ferramenta amplamente difundida para cumprir com essas prerrogativas; (iv) análise de criticidade, tradicionalmente utiliza-se o cálculo do número de prioridade de risco, do inglês *risk priority number*; (v) seleção da estratégia de manutenção.

A aplicação desses estágios deve ser conduzida de modo iterativo, ou seja, o sucesso dos passos posteriores depende de uma execução assertiva do passo anterior. Superado esses estágios, (SAJARADJ; HUDA; SINULINGGA, 2019) postula que após a condução desse processo, é salutar que os resultados de sua análise sejam implementados e destaca a importância da gestão de pessoas, tendo em seu quadro de pessoal profissionais tecnicamente preparados e dispostos a implementar as diretrizes obtidas.

2.3. Análise de modos de falha e efeitos (FMEA)

Dentro do contexto do ciclo de implementação da RCM, a ferramenta (FMEA), constitui-se como uma ferramenta central do RCM (GUPTA; MISHRA, 2017), que compreende os passos 3 e 4 descritos na seção anterior. Portanto, essa ferramenta é hábil para identificar os potenciais modos de falha e suas respectivas consequências, de modo a prescrever estratégias adequadas para cada um dos sistemas analisados com vistas a reduzir a chance de ocorrência da falha, e sua severidade, e aumentar a possibilidade de detecção (LO; LIOU, 2018).

Ainda no bojo dessa temática, faz-se necessário definir o que seria falha nos contextos operativos. Segundo a literatura clássica sobre gestão da manutenção e RCM, falha pode ser definida como um desempenho adverso da condição original, que se mostra insatisfatório para seus usuários em virtude de sua consequência, podendo ainda ser classificada como falha funcional, que gera inaptidão de um item performar conforme suas especificações, e falha potencial, que depreende a existência de algum fator que indique uma inaptidão iminente (F. STANLEY; HOWARD F., 1978). Nesse sentido, cada falha tem atrelada a si, a um só tempo, sintoma(s) de falha, modo(s) de falha, causa(s) de falha e efeito(s) de falha (SMITH; HINCHCLIFFE, 2004). Os sintomas de falha, que decorrem de um somatório de falhas latentes, designam sinalizações que alertam uma iminência de ocorrência da falha (WANG et al., 2014). Os modos de falha, por sua vez, podem ser definidos como os eventos que se associam à falha, ou seja, configura-se como o motivo de existência das falhas (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2015). As causas de falha consistem na discriminação dos fatores responsáveis pelos modos de falha e demandam, portanto, uma análise diagnóstica ou formulação de hipóteses (SMITH; HINCHCLIFFE, 2004). Por fim, os efeitos de falha apontam para os efeitos imediatos e de longo prazo decorrentes da concretização da falha, ou seja, indicam o que ocorre caso a falha seja verificada (ERIKSEN; UTNE; LÜTZEN, 2021).

A FMEA, portanto, é enunciada como uma técnica estruturada de gerenciamento da confiabilidade de produtos, processos e serviços, uma vez que identifica modos de falha (conhecidas ou potenciais) e indica previamente a necessidade de atribuição de recursos e concentração de esforços de melhoria, fornecendo, assim, materialidade para tomada de decisões e gestão de risco (HU-CHEN et al., 2019; LIU; LIU; LIU, 2013a). Diante disso, pretende-se com o uso dessa ferramenta fazer uma alocação eficiente dos recursos de manutenção, limitados, para os itens mais críticos, considerando o paradigma de suas falhas e consequências em potenciais (GUPTA; MISHRA; SINGHVI, 2016). Corrobora-se, portanto, que a aplicabilidade da ferramenta FMEA relaciona-se, portanto, à avaliação de risco e melhoria da segurança do sistema (LO; LIOU, 2018). Destaca-se, ainda, que a FMEA, quando aplicada para análise de criticidade, é referenciada como Análise de modos de falha, efeitos e criticidade, do inglês *failure mode effects and criticality analysis (FMECA)*(ALRIFAHEY et al., 2019; GUPTA; MISHRA, 2017; HU-CHEN et al., 2019; LIU; LIU; LIU, 2013a).

De acordo com Kumari et al. (2023) um processo convencional de aplicação da ferramenta FMEA consiste em: (i) coletar informações de funções do sistema; (ii) identificar os potenciais modos de falha; (iii) determinar uma pontuação para cada um dos modos de falhas estratificados pelos fatores de risco denominados severidade, ocorrência e Detecção; (iv) calcular o número de prioridade de risco (RPN) considerando as pontuações anteriormente atribuídas, classificando cada sistema de acordo com seu respectivo número RPN (GUPTA; MISHRA, 2017) e, por fim, (v) sugerir ações corretivas. Dentro dessa conjuntura, porém, alguns desses estágios apresentam algumas limitações. Nesse sentido, os estágios (iii) e (iv) concentram as problemáticas mais proeminentes apontadas na literatura. Em caráter resumitivo, a condução desses estágios pode ser descrita a partir do cálculo de um número de RPN para cada modo de falha, considerando para isso, os valores atribuídos para cada um dos fatores S, O e D, de acordo com uma escala numérica (0-10), e prosseguir posteriormente com a classificação desses modos de falha. Essa classificação deve ser operacionalizada a fim de que o modo de falha com o maior risco associado deve ficar melhor posicionado e, em consequência, o modo de falha com o menor risco associado deve ocupar a última posição no ranking (LIU; LIU; LIU, 2013a). Embora esses passos sejam de simples execução, algumas limitações são latentes, conforme destacado anteriormente. Dentre as quais se destacam:

- I. O RPN, que agrega os valores obtidos nas dimensões S, O e D, pode apresentar valores exatamente iguais para combinações diferentes de S, O e D, as quais indicariam avaliações de riscos distintas, não considerando, portanto, a

importância relativa de cada uma das dimensões descritas (OUYANG et al., 2020).

- II.** A atribuição de valores, por especialistas, em cada uma das dimensões S, O e D tem um caráter subjetivo, e dependente de seus respectivos conhecimentos e experiências, pressupondo uma avaliação por vezes vaga e/ou imprecisa (LO; LIOU, 2018).
- III.** O cálculo do RPN limita-se apenas aos fatores S, O e D, não levando em consideração, portanto, outros fatores que seriam relevantes numa análise de risco, como, por exemplo, a dimensão econômica (GUPTA; MISHRA, 2017).

Em virtude dessas limitações, a academia mostrou-se um campo fértil para a condução de pesquisas que combinassem outros métodos e/ou teorias para melhorar a confiabilidade na ferramenta FMEA. Diante disso, observou-se uma série de produções acadêmicas que evidenciaram tais esforços. Liu et al. (2013a), em uma revisão sistemática, listaram que os métodos descritos na literatura para melhorar o processo de análise de criticidade da ferramenta FMEA podem ser agrupados em modelos de apoio multicritério à decisão (MCDM), programação matemática (MP), inteligência artificial (IA) e abordagens integradas. Complementarmente, numa abordagem mais ampla, Iqbal et al. (2017) aponta a crescente utilização de modelos para a avaliação de risco, que segundo a sua classificação são: qualitativos, semi-quantitativos ou quantitativos.

Para Iqbal et al. (2017), a implementação de políticas de manutenção, inclusive RCM, pode ser modelada como um processo multicritério de decisão, cuja seleção de métodos deve se adequar ao problema que se quer analisar. Nessa mesma seara, Geramian et al. (2017) afirmam que sistemas de inferência fuzzy, na categoria de inteligência artificial, consistem no método mais proeminente para resolver os problemas de FMEA (GERAMIAN et al., 2017).

2.4. Teoria dos conjuntos fuzzy

Conforme alguns estudos reiteram (KABIR; SADIQ; TESHAMARIAM, 2016; MEHRJERDI, 2012), pesquisas de caráter qualitativo possuem ambiguidades e imprecisões, isso decorre da problemática de que julgamentos de determinados fenômenos provenientes do cognitivo humano não são diretamente compreendidos em termos quantitativos. Zadeh (1965) inovou propondo que esses entendimentos poderiam ser facilitados através da correspondência numérica dos dados representados por linguagem natural ou artificial, com

base em processos específicos. Portanto, essa abordagem é eficaz para lidar com as imprecisões, ambiguidades e subjetividades inerentes ao raciocínio humano (MAMDANI, 1977; MEHRJERDI, 2012; ZADEH, 1965; ZENG; LI, 2007).

2.4.1. Lógica fuzzy

A lógica fuzzy lida com raciocínio aproximado, em vez de fixo e exato, pois assume que o valor da verdade (o que é expresso por especialistas) não é absoluto, podendo, portanto, variar entre totalmente verdade e totalmente falso. Além disso, quando variáveis linguísticas são usadas, esses graus podem ser tratados por funções definidas. Os dois conceitos mais significativos dentro da lógica difusa são a variável linguística e a regra fuzzy se-então (POURJAVAD; SHAHIN, 2018; SABRI et al., 2013).

2.4.2. Variável fuzzy

Ao contrário da lógica binária tradicional, que opera com valores (0 ou 1), a lógica fuzzy permite a representação de informações vagas ou ambíguas utilizando variáveis linguísticas e conjuntos fuzzy (SABRI et al., 2013). Um conjunto fuzzy $\tilde{A}$ em um universo de discurso X é definido pela função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ que associa a cada elemento x em X um número real no intervalo $[0,1]$. Um conjunto fuzzy $\tilde{A}$ em X é definido por: $\tilde{A} = \{x, \mu_{\tilde{A}}(x)\}, x \in X$, onde o valor da função de pertinência $\mu_{\tilde{A}}(x)$ assume valores entre $[0,1]$ (ZADEH, 1965), denotando assim que o não pertencimento completo é demonstrado pelo 0 e o pertencimento completo pelo 1.

Um número fuzzy é um conjunto fuzzy no qual a função de pertinência satisfaz as condições de normalidade e convexidade (POURJAVAD; SHAHIN, 2018; ZIMMERMANN, 2010), válidas para todo $x_1, x_2 \in X$ e para todo $\lambda \in [0,1]$, representadas respectivamente pelas equações 1 e 2.

$$\sup_{x \in X} \tilde{A}[x] = 1 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\tilde{A}[\lambda x_1 + (1 - \lambda)x_2] \geq \min[\tilde{A}(x_1), \tilde{A}(x_2)] \quad \text{Eq. 2}$$

Existem diferentes classes de números fuzzy, as quais são, habitualmente, de natureza triangular ou trapezoidal, conforme (DELGADO; VERDEGAY; VILA, 1992; KREINOVICH;

KOSHELEVA; SHAHBAZOVA, 2018) ilustram. Na presente pesquisa, os números fuzzy triangulares serão adotados, uma vez que possuem uma aplicabilidade eficaz para casos práticos, conforme comprovou (KREINOVICH; KOSHELEVA; SHAHBAZOVA, 2018). Em relação à formulação, adota-se a premissa de que a função de pertinência de um número fuzzy triangular $\tilde{A}$ é denotada pela Eq. 3, a qual está grafada a seguir:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0, & x < l \\ \frac{x-l}{m-l}, & l \leq x \leq m \\ \frac{u-x}{u-m}, & m \leq x \leq u \\ 0, & x \geq u \end{cases} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde l , m e u são números reais com $l \leq m \leq u$. Fora do intervalo $[l, u]$, o grau de pertinência é nulo, e m representa o ponto em que o grau de pertinência é máximo.

2.4.3. Regras fuzzy

As regras *se-então* são reconhecidas como o núcleo de um sistema de inferência fuzzy e todos os outros componentes, tais como funções de pertinência, têm sido utilizados para implementar estas regras de uma forma razoável, realista e eficiente (POURJAVAD; SHAHIN, 2018). A dinâmica de comportamento de um sistema fuzzy é descrita por meio dessas regras, envolvendo conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e inferência fuzzy (SABRI et al., 2013).

Essas regras são formuladas a partir do conhecimento e da experiência de um especialista humano no respectivo domínio e seguem a seguinte estrutura: se determinada condição (antecedente), então ocorre uma ação específica (consequente). As partes antecedentes e consequentes, no domínio linguístico, podem combinar conjuntos fuzzy por meio de operadores lógicos dos tipos AND e OR (Balal et al., 2016; Sabri et al., 2013) e denotam, respectivamente, variáveis de entrada (input) e variáveis de saída (output) (Pourjavad & Shahin, 2018).

2.4.4. Sistema de Inferência Fuzzy (SIF)

(Balal et al., 2016; Pourjavad & Shahin, 2018) atestam que o sistema de inferência fuzzy (FIS) é uma das ferramentas centrais da teoria dos conjuntos fuzzy, pois lida com o mapeamento de variáveis de entrada, relacionando-as com variáveis de saída, as quais são inferidas a partir da aplicação de um conjunto de regras de inferência lógica, conforme descrito na seção 2.3.1.2, para modelar um processo humano de tomada de decisão, definindo, portanto, padrões e embasamento (Sarfaraz et al., 2023).

Portanto, essa ferramenta possibilita obter conclusões por meio de análise de premissas estruturadas (ZANON et al., 2020) e endereça questões importantes no contexto de decisões multicritério, em razão de sua capacidade de modelar incertezas inerentes ao raciocínio humano. Essencialmente, o que difere as abordagens dos diferentes sistemas de inferência fuzzy existentes são as formas de cálculo da saída fuzzyficada de uma regra e, os mais proeminentes da literatura, são os de Mamdani e Sugeno (Balal et al., 2016).

Para a presente pesquisa, o método Mamdani será adotado, uma vez que a base de analítica das regras é definida a partir de opiniões de especialistas (BORANY; SADKHAND-SMIEEE, 2021; ZANON et al., 2020) e, portanto, eficiente para endereçar problemas relacionados à gestão de processos industriais (Ratnayake, 2014). Em 1975, Mamdani representou um dos primeiros sistemas fuzzy, que consistiu numa aplicação de conjuntos de regras definidas por especialistas, a fim de controlar o processo de operação de máquinas (POURJAVAD; SHAHIN, 2018). O sistema proposto por Mamdani pode ser visualizado na Figura 1.

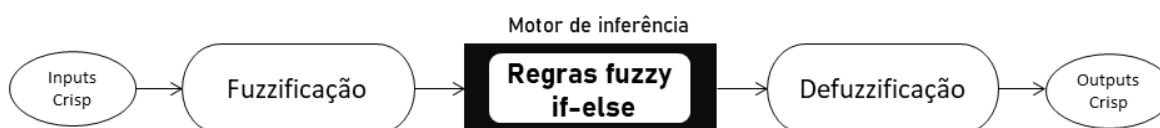


Figura 1 - Sistema Inferencial Fuzzy proposto por Mamdani (1975)

Conforme a seção 2.4.3, os antecedentes da regra podem ser combinados, a fim de gerar resultados de antecedentes específicos, que sejam representativos, do ponto de vista especialista. Essa combinação se dá por meio dos operadores lógicos “E” ou “OU”. Portanto, para manipular os números fuzzy durante as etapas do processo, ao se usar o conectivo lógico “E”, a t -norma[^] (mínimo) é geralmente adotada, expressa pela Eq. 4.

$$\mu_A(x) \text{ and } \mu_B(x) = MIN \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}. \quad \text{Eq. 4}$$

Analogamente, ao se usar o conectivo lógico “OU”, para concatenar ideias no antecedente, a s-norma é utilizada e o valor máximo é expresso pela Eq. 5.

$$\mu_A(x) \text{ or } \mu_B(x) = MAX \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}. \quad \text{Eq. 5}$$

Após a ativação das regras, no motor de inferência, há implicação R entre o número fuzzy resultante das operações lógicas e o consequente. Um operador de implicação comumente usado é o mínimo (Mamdani), expresso pela Eq. 6.

$$\mu_R(x, y) = MIN \{\mu_A(x), \mu_B(x)\}. \quad \text{Eq. 6}$$

Ainda nessa conjuntura relacional no motor de inferência, é possível utilizar-se dos operadores alternativos Max-Min (Zadeh) e multiplicação (Larsen), relacionados respectivamente pelas equações Eq. 7 e Eq. 8.

$$\mu_R(x, y) = MAX \{1 - \mu_A(x), MIN\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}\}. \quad \text{Eq. 7}$$

$$\mu_R(x, y) = \{\mu_A(x) * \mu_B(x)\}. \quad \text{Eq. 8}$$

Para o número fuzzy de saída de cada regra, há uma composição entre um singleton fuzzy e a relação de implicação. Os operadores de composição de relações fuzzy comumente usados são Max-Min, Max-Prod e Max-Média, respectivamente representados nas equações Eq. 9, Eq. 10 e Eq. 11.

$$SoR(x, y) = MAX\{MIN(\mu_S(x, y), \mu_R(y, z))\} \quad \text{Eq. 9}$$

$$S.R(x, z) = MAX\{(\mu_S(x, y) * \mu_R(y, z))\} \quad \text{Eq. 10}$$

$$S \oplus R(x, z) = MAX \{1/2(\mu_S(x, y) + \mu_R(y, z))\} \quad \text{Eq. 11}$$

A etapa final no processo de inferência é uma agregação das operações de composição resultantes para cada regra. Embora haja diferentes tipos de operações que poderiam ser aplicadas nesse processo de agregação, como média aritmética, geométrica ou harmônica, Min-Max, a operação de maximização (Max), é preferida quando a compensação entre variáveis de entrada é desejável, conforme Eq. 12.

$$AG(.) = MAX (\mu_{R1}(x), \mu_{R2}(x), \dots, \mu_{Rn}(x)) \quad \text{Eq. 12}$$

Na etapa final do processo, atividade de defuzzificação, os números difusos de saída são alterados para um número crisp. Há inúmeras abordagens para o processo de defuzzificação, como princípio máximo de associação, método do centroide, método da média ponderada, associação máxima média (meio do máximo), centro de somas, centro de maior área, primeiro (ou último) do máximo (KLIR; YUAN, 1995; ROSS, 2004). Dentre estes, o método do centroide constitui-se como o mais prevalecente, quando comparado com os demais (ROSS, 2004). Nesta técnica, considerando todos os pontos discretos que compõem o conjunto fuzzy resultante, $\mu_A(z)$ é a saída agregada, conforme Eq. 13.

$$\text{centro de área } Z_{COA} = \frac{\int_z \mu_A(Z)Z dz}{\int_z \mu_A(Z) dz} \quad \text{Eq. 13}$$

Embora as aplicações do sistema de inferência fuzzy mostrem-se relevantes para abordar problemas tanto da esfera acadêmica quanto da esfera prática, a relação entre o número de variáveis de entrada e as regras de inferência estabelece-se como uma problemática que, em casos mais complexos, torna a sua aplicação inviabilizada (CASALINO et al., 2020; DICK; KANDEL, 1999; TORRA, 2002). Isso ocorre, pois, n variáveis de entrada, que implicam na existência de um respectivo conjunto fuzzy m , demandam a construção de m^n regras para a composição do motor de inferência, dificultando, assim, que seja estabelecida uma relação representativa de todas as variáveis (CASALINO et al., 2020). Essa conjuntura é amplamente reconhecida na literatura como o fenômeno de explosão de regras (CASALINO et al., 2020; DICK; KANDEL, 1999; RAZAK et al., 2023).

Além disso, em virtude do dinamismo dos ambientes de aplicação das ferramentas, que demandam atualização constante de análise e reanálise, excluindo e incluindo variáveis do modelo, de modo a mantê-lo representativo, quando se trata de um sistema FIS convencional, a supressão e/ou inclusão de variáveis, modifica por completo a natureza do

sistema, sendo necessário, portanto, um mapeamento extenso, tornando assim, a mudança complexa (RAZAK et al., 2023; TORRA, 2002).

2.4.5. Sistema hierárquico de inferência fuzzy (HSIF)

O Sistema hierárquico de inferência fuzzy (HSIF) é delineado para mitigar as limitações do FIS clássico. Essa abordagem implica na subdivisão do FIS clássico em diversos subsistemas fuzzy de baixa dimensão, a fim de promover que os antecedentes das regras estabelecidas contenham menos variáveis (RAJU; ZHOU; KISNER, 1991). Isto resulta na limitação do fenômeno de explosão de regras que, como consequência, reduz a complexidade do modelo e facilita a compreensão e análise do sistema fuzzy (RAZAK et al., 2023). A transformação de um único FIS em múltiplos FIS de baixa dimensionalidade lineariza o crescimento do número de entrada.

Um HSIF pode ser enunciado como uma decomposição de um FIS, onde a integração dos FIS de níveis inferiores são relacionandos através de camadas, onde a saída de uma camada (FIS_i), torna-se a entrada da próxima camada (FIS_{i+2}) (CASALINO et al., 2020; RAZAK et al., 2023), conforme Figura 2.

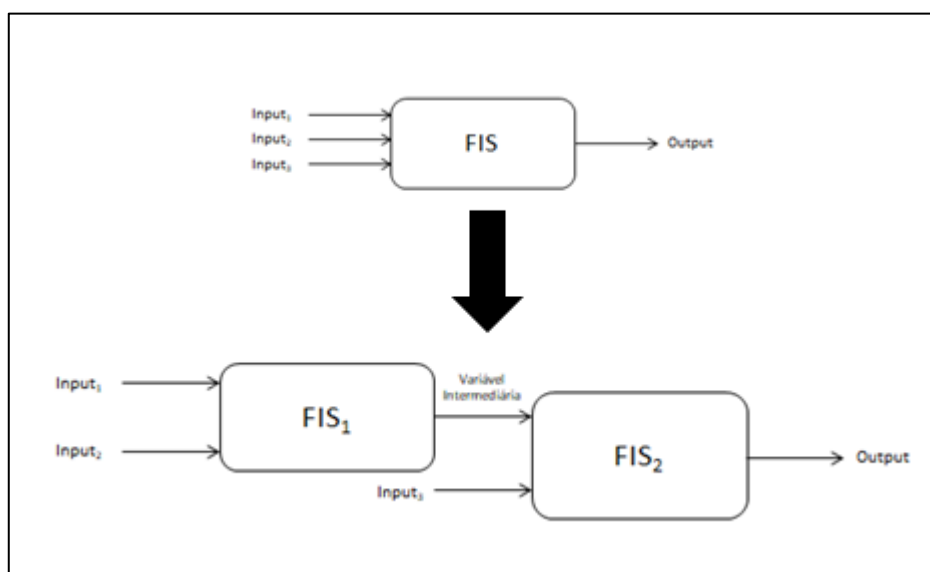


Figura 2 – Equivalência de um FIS clássico para um FIS hierárquico

Fica em evidência, pois, que os dois sistemas são equivalentes, portanto, todas as operações relativas aos processos que compõem um FIS clássico, descritas na seção 2.4.4, podem ser aplicadas para um HFISs. Inclusive, essa condição fica comprovada, ao transcrever as variáveis de saída, como função das variáveis de entrada, inclusive a intermediária, no caso do HFIS (RAZAK et al., 2023), conforme Eq. 14.

$$\text{Output} = F(\text{input}_1, \text{input}_2, \text{input}_3) \leftrightarrow \text{Output} = F_2(\text{input}_3, F_1(\text{input}_2, \text{input}_3)) \quad \text{Eq. 14}$$

Adicionalmente, considerando que para cada variável de entrada, incluindo as intermediárias, há um conjunto fuzzy associado, o total de regras pode ser descrito pela seguinte equação: $R = (n - 1) * m^2$ (Eq. 15), comprovando a redução do número de regras (CASALINO et al., 2020).

Por fim, partindo do pressuposto que um HFIS é uma decomposição de outros FISs, (RAZAK et al., 2023) propuseram um framework para balizar a transformação de um FIS clássico, para um FIS hierárquico, que consiste na operacionalização de dois passos principais, quais sejam: I. Extrair o conhecimento de um FIS padrão e, II. Traduzir essas informações para uma estrutura hierárquica. O segundo passo é construído a partir dessas ações: (i) escolher a topologia, quais sejam: paralela, serial ou híbrida; (ii) alocar, para cada subsistema fuzzy, dois inputs. Essa sistemática gera, para 1 variável de saída ou uma variável intermediária; (iii) definir o termo linguístico constante para todas as variáveis de entrada, incluindo as variáveis intermediárias; (iv) definir a base de regras para todos os subsistemas e por fim, (v) conectar os subsistemas fuzzy, através das variáveis intermediárias. Nesses casos, as variáveis intermediárias derivam de soluções intermediárias de subsistemas, que se tornam variáveis de entrada dos subsistemas subsequentes.

2.5. Método Best- Worst (BWM)

O método Melhor-Pior (BWM) é uma abordagem inovadora para a tomada de decisões multiatributo (MADM), caracterizada por menos comparações em pares entre os critérios e resultados confiáveis. Nesta metodologia, o tomador de decisão, inicialmente, identifica os critérios considerados como os piores e os melhores. O critério designado como o melhor é considerado o mais crucial, enquanto o critério identificado como o pior é percebido como o menos importante, ambos sendo determinados pelo próprio tomador de decisão (Rezaei,

2015). Um problema multicritério de natureza discreta pode ser descrito de acordo com a matriz A , representada na Eq. 16, onde $\{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ é um conjunto que denota as possíveis alternativas disponíveis para a tomada de decisão, $\{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ é um conjunto de critérios de decisão a serem considerados para a tomada de decisão e, p_{ij} são as pontuações da alternativa i em relação ao critério j .

$$A = \begin{matrix} & & c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_m \end{matrix} & \left[\begin{array}{cccc} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \dots & p_{mn} \end{array} \right] \end{matrix} \quad \text{Eq. 16}$$

A resolução de problemas dessa natureza objetiva selecionar a melhor alternativa, que, a depender do contexto estudado, pode ser o maior ou menor valor global das alternativas (Eq. 17). De forma geral, se atribuírmos o peso w ($w_j > 0, \sum w_j = 1$) para o critério j , então V_i pode ser obtido usando uma função aditiva e de valor ponderado simples, que é o modelo subjacente para a maioria dos métodos de tomada de decisão multicritério (MCDM), da seguinte forma:

$$V_i = \sum_{j=1}^n w_j p_{ij} \quad \text{Eq. 17}$$

O valor global da alternativa i , denotado por V_i , pode ser obtido utilizando vários métodos, os quais, em sua grande maioria, utilizam-se de comparação par a par das alternativas, conforme todas as combinações possíveis, para então gerar uma métrica que direcione a decisão. No entanto, estabelecer uma relação comparativa entre as alternativas não é trivial.

Segundo (REZAEI, 2015), é simples indicar qual (is) alternativa(s) é (são) melhores/piores que as demais, mas a qualificação desse juízo de valor, ou seja, o quanto uma alternativa é melhor/pior do que a outra pode ser fonte de inconsistências. É sob esse aspecto que o método BWM se debruça, propondo que para mitigar essa problemática, duas premissas principais sejam adotadas, a saber: (i) comparar a melhor alternativa com as demais e (ii) Comparar todas as alternativas possíveis com a pior, clarificando, assim, o

entendimento e estabelecendo relações mais fidedignas que os métodos tradicionais. A resolução, portanto, desses tipos de problema, pode ser alcançada a partir de 5 passos:

- I.** Determinar o conjunto de critérios de decisão;
- II.** A partir do conjunto de critérios definido, qualificar dentre eles, o melhor (mais importante/significativo) e o pior (menos importante/significativo), respectivamente;
- III.** Determinar a preferência do melhor critério em relação aos demais, conforme vetor representado na Eq. 18 onde a_{Bj} indica a preferência do melhor critério (B) em relação ao critério j. Essa preferência deve ser incada numa escala entre 1-9 e, a_{BB} recebe 1.

$$A_b = (a_{B1}, a_{B2}, \dots, a_{Bn}) \quad \text{Eq. 18}$$

- IV.** Determinar a preferência dos demais critérios em relação ao pior, conforme vetor representado na Eq. 19, onde a_{jw} indica a preferência do critério j em relação ao pior critério (W). Essa preferência deve ser incada numa escala entre 1-9 e, a_{ww} recebe 1.

$$A_w = (a_{1W}, a_{2W}, \dots, a_{nW})^T \quad \text{Eq. 19}$$

- V.** Localizar os pesos ótimos ($W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$). O peso ótimo é obtido quando ao comparar as alternativas (Melhor-Demais alternativas; Demais alternativas-Pior), observam-se as seguintes relações a seguir:

$$\frac{W_B}{W_j} = a_{Bj} \quad \text{Eq. 20}$$

$$\frac{W_j}{W_w} = a_{jW} \quad \text{Eq. 21}$$

Para garantir que as relações descritas nas Eq. 20 e Eq. 21 sejam satisfeitas para todos os critérios analisados, devemos encontrar uma solução em que as diferenças absolutas máximas da Eq. 22 e da Eq. 23 para todos os critérios j sejam minimizadas.

$$\left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \quad \text{Eq. 22}$$

$$\left| \frac{W_j}{W_w} - a_{jW} \right| \quad \text{Eq. 23}$$

Considerando as condições de não-negatividade e de soma para os pesos, o seguinte problema é resultante:

$$\begin{aligned}
 & \min \max \left\{ \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right|, \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \right\} \\
 \text{s.a.} \quad & \sum_j W_j = 1 \\
 & W_j \geq 0, \text{ para todo } j
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 24}$$

O problema representado pela Eq. 24, pode ser transcrito em um problema de minimização, conforme Eq. 25.

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } \xi \\
 \text{s.a.} \quad & \left| \frac{W_B}{W_j} - a_{Bj} \right| \leq \xi, \text{ para todo } j \\
 & \left| \frac{W_j}{W_W} - a_{jW} \right| \leq \xi, \text{ para todo } j \\
 & \sum_j W_j = 1 \\
 & W_j \geq 0, \text{ para todo } j
 \end{aligned}
 \tag{Eq. 25}$$

Resolvendo o problema (6), os pesos ótimos ($W_1^*, W_2^*, \dots, W_n^*$) são obtidos. Após operacionalizar as etapas do método BWM é necessário avaliar se os resultados obtidos são representativos. A comparação é completamente consistente quando $a_{Bj} \times a_{jW} = a_{BW}$, para todo j , onde a_{Bj}, a_{jW} e a_{BW} são, respectivamente, a preferência do melhor critério sobre o critério j , a preferência do critério j sobre o pior critério e a preferência do melhor critério sobre o pior critério. A avaliação de consistência também pode feita através do cálculo da razão entre o ξ^* , obtido na resolução da Eq. 20, e o índice de consistência, tabelado (REZAEI, 2015) de acordo com o preferência do melhor critério em relação ao pior critério a_{BW} . Nessa seara, uma razão de consistência próxima de zero denota uma ótima consistência.

2.6. Método fuzzy VIKOR

Retomando a questão de que o processo decisório é essencialmente complexo em virtude das imprecisões que cerceiam as percepções dos especialistas em relação a uma determinada matéria, há muito tem crescido o número de produções que abordam metodologias integradas de modelos multicritério com a teoria fuzzy. Desse modo, pretende-se mitigar as incertezas e imprecisões, que adveem das percepções dos especialistas (informações qualitativas) para definir critérios e suas respectivas importâncias (OPRICOVIC, 2011). Portanto, reitera-se, métodos multicritérios convencionais não endereçam a questão da imprecisão e incerteza.

O método fuzzy VIKOR é aplicado para resolver problemas complexos em um ambiente fuzzy, onde tanto os critérios quanto os pesos podem ser conjuntos fuzzy, ambos representados por conjuntos fuzzy triangulares, e baseia-se no mérito fuzzy agregado, que representa a distância de uma alternativa para a solução ideal. O VIKOR (VIsekriterijumska optimizacija i KOmpromisno Resenje), método que antecede o fuzzy VIKOR, concentra-se na classificação e seleção de um conjunto de alternativas na presença de critérios conflitantes e na proposição de uma ou mais soluções de compromisso, que consiste na obtenção da solução viável mais próxima do ideal (Opricovic & Tzeng, 2004).

O método fuzzy VIKOR foi desenvolvido para determinar a solução de compromisso do problema multicritério fuzzy, onde: J é o número de alternativas viáveis; $A_j = \{x_1, x_2, \dots\}$ é a j -ésima alternativa obtida (gerada) com determinados valores das variáveis do sistema x ; f_{ij} é o valor da i -ésima função de critério para a alternativa A_j ; n é o número de critérios; mco denota o operador de um procedimento de tomada de decisão multicritério para selecionar a melhor (compromissada) alternativa no sentido multicritério. Alternativas podem ser geradas e sua viabilidade pode ser testada por meio de modelos matemáticos (determinando variáveis x), modelos físicos e/ou por experimentos no sistema existente ou em outros sistemas similares. As restrições são consideradas como objetivos de alta prioridade, que devem ser satisfeitos no processo de geração de alternativas, conforme representado na Eq. 26.

$$mco \{f_{ij}(A_j), j = 1, \dots, J, i = 1, \dots, n\} \quad \text{Eq. 26}$$

As alternativas são avaliadas pelos números fuzzy triangulares $f_{ij} = (l_{ij}, m_{ij}, r_{ij}), i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, J$. O conjunto de critérios que representam benefícios (efeitos positivos) é

denotado por I^b , e um conjunto I^c , para custos. Aqui, $|I^b \cup I^c| = n$, e $|\cdot|$ denota um número cardinal. O algoritmo de classificação VIKOR tem os seguintes passos (OPRICOVIC, 2011):

I. Determinação dos valores ideais ($f_i^* = l_i^*, m_i^*, r_i^*$) e nadir ($f_i^\circ = l_i^\circ, m_i^\circ, r_i^\circ$) para todas as funções ($i = 1, 2, \dots, n$) que determinam os critérios. Esses valores, portanto, são respectivamente, os melhores e piores valores alcançáveis para cada critério, conforme equações Eq. 27 e Eq. 28.

$$f_i^* = \text{MAX } f_{ij}, f_i^\circ = \text{MIN } f_{ij}, \text{ para } i \in I^b; \quad \text{Eq. 27}$$

$$f_i^* = \text{MIN } f_{ij}, f_i^\circ = \text{MAX } f_{ij}, \text{ para } i \in I^c; \quad \text{Eq. 28}$$

II. Computar as diferenças fuzzy normalizadas d_{ij} , $j = 1, \dots, J$, $i = 1, \dots, n$, conforme equações Eq. 29 e Eq. 30:

$$d_{ij} = (f_i^* \ominus f_{ij}) / (r_i^* - l_i^\circ) \text{ para } i \in I^b; \quad \text{Eq. 29}$$

$$d_{ij} = (f_{ij} \ominus f_i^*) / (r_i^\circ - l_i^*) \text{ para } i \in I^c; \quad \text{Eq. 30}$$

III. Computar $S_j = (S_j^l, S_j^m, S_j^r)$ e $R_j = (R_j^l, R_j^m, R_j^r)$, $j = 1, 2, \dots, J$, através das seguintes relações, onde S é a soma dos pesos fuzzy, R é o MAX do operador fuzzy (OPRICOVIC, 2011), w_i são os pesos dos critérios que expressam as preferências dos decisores como a importância relativa do critério, representadas pelas equações Eq. 31 e Eq. 32:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \oplus (w_i \otimes d_{ij}) \quad \text{Eq. 31}$$

$$R_j = \text{MAX}(w_i \otimes d_{ij}) \quad \text{Eq. 32}$$

IV. Computar os valores $Q_j = (Q_j^l, Q_j^m, Q_j^r)$, $j = 1, 2, \dots, J$, através da seguinte relação, onde $S^* = \min S_j, S^{or} = \max_j S_j^r$, $R^* = \min R_j, R^{or} = \max_j R_j^r$, conforme Eq. 33 e v é introduzido como um peso para a estratégia da “maioria dos critérios” (ou “a utilidade máxima do grupo”), enquanto $(1-v)$ é o peso do arrependimento individual. Essas estratégias poderiam ser comprometidas por $v = 0,5$, e aqui v é modificado como $v = (n + 1) / 2n$, de $(v + 0,5(n-1)/n = 1)$ já que o critério (1 de n) relacionado a R também está incluído em S . Os melhores valores de S e R são denotados por S^* e R^* , respectivamente:

$$Q_j = \frac{v(S_j \ominus S^*)}{S^{or} - S^{*l}} \oplus (1 - v) \frac{(R_j \ominus R^*)}{R^{or} - R^{*l}} \quad \text{Eq. 33}$$

V. Criar um ranking das alternativas classificando o core dos valores Q_j^m , $j = 1, 2, \dots, J$, em ordem decrescente, denotado por $\{A\}_Q^m$.

VI. Criar um ranking fuzzy das alternativas. A j -ésima posição em $\{A\}_Q^m$ da alternativa $A^{(j)}$, $j = 1, 2, \dots, J$, é conformado se $\min Q^{(k)} = Q^{(j)}$, onde $J^j = \{j, j+1, \dots, J\}$ e $Q^{(k)}$ é o mérito fuzzy para a alternativa $A^{(k)}$ na k -ésima posição em $\{A\}_Q^m$.

VII. Defuzzificar S_j, R_j, Q_j , $j = 1, 2, \dots, J$, pelas relações $\text{Crisp}(N) = (2m + l + r) / 4$.

VIII. Criar três rankings das alternativas, classificando-as de acordo com seus respectivos valores crisp S, R e Q em ordem decrescente, representados, respectivamente, por: $\{A\}_S, \{A\}_R$ e $\{A\}_Q$.

IX. Propor a solução de compromisso da alternativa $(A^{(1)})$, que é a melhor alternativa rankeada na medida Q (em $\{A\}_Q$).

O método Fuzzy VIKOR é especialmente útil quando há incerteza nos dados de entrada ou quando as preferências dos decisores são expressas de maneira vaga. A lógica fuzzy é empregada para lidar com essa ambiguidade, permitindo que o método forneça resultados mais robustos em ambientes de decisão complexos e incertos.

3. Metodologia de Pesquisa

Reitera-se, portanto, que a proposta da presente pesquisa é produzir um produto tecnológico, inovador, que seja capaz de colocar à disposição das equipes de gestão de manutenção um *framework* sistemático para otimizar o planejamento de manutenção de ativos complexos, considerando a criticidade de cada um de seus componentes. Para viabilizar o que fora proposto, a abordagem *Design Science Research* (DSR) será utilizada, visto que se constitui como abordagem de pesquisa eficaz para a produção de artefatos viáveis e relevantes para um determinado domínio (LESSARD; YU, 2012). Dentro do paradigma metodológico adotado, DSR, um estudo empírico será desenvolvido para avaliação do artefato proposto, que é temática central e crítica dessa metodologia (LACERDA et al., 2013; VENABLE; PRIES-HEJE; BASKERVILLE, 2016).

3.1. Design science research (DSR)

DSR é um paradigma de pesquisa, de natureza prescritiva, que visa trazer soluções para problemáticas organizacionais e sociais, através da criação de artefatos que sejam inovadores, gerando, assim, uma base de conhecimento por meio de um processo com reconhecido rigor científico (VOM BROCKE; HEVNER; MAEDCHE, 2020). Em virtude disso, tornou-se uma metodologia amplamente utilizada em muitas áreas do conhecimento, tais como: Engenharia, Arquitetura, Economia, dentre outros, embora fosse concebida para o domínio de sistemas de informação. Segundo (GREGOR; HEVNER, 2013), os artefatos supracitados podem constituir-se em, por exemplo, sistemas de apoio à decisão, ferramentas de modelagem, estratégias de governança e métodos para avaliação de sistemas de informação.

Destaca-se, também, que esses artefatos devem possuir algumas características gerais, quando concebidos dentro da metodologia DSR, quais sejam (PEFFERS et al., 2007): (i) ser relevante na resolução de um problema comprovadamente não resolvido; (ii) convergir utilidade, qualidade e eficácia e (iii) possuir contribuição verificável mediante um processo científico, via métodos observacionais, analíticos, experimentais, ensaios ou descritivos (HEVNER, A., MARCH, S., PARK, J., & RAM, 2004). Tendo em vista esse rigor, (LACERDA et al., 2013) destacaram, ainda, a relevância dessa abordagem no contexto da Engenharia de Produção, uma vez que se constitui como uma chancela para os resultados produzidos através do artefato proposto. Considerando, pois, essas nuances que circundam e corroboram a importância dessa metodologia, para a presente pesquisa essa abordagem será

utilizada, com vistas a gerar um artefato (framework de apoio à decisão) para otimizar o planejamento de manutenção de ativos complexos.

Para isso, o framework de (PEFFERS et al., 2007) será utilizado, o qual indica que a DSR pode ser operacionalizada através de alguns estágios, os quais são iterativos, ou seja, preveem que os pesquisadores avancem em cada estágio cientes de que podem retomar estágios anteriores para garantir o rigor metodológico. Tais estágios são: (i) identificação do problema e motivação; (ii) definição dos objetivos atinentes a uma solução viável; (iii) criação do artefato (*design* e desenvolvimento); (iv) demonstração da usabilidade do artefato proposto, evidenciando que o mesmo é apropriado para resolução do problema abordado (v) avaliação, destacando como o artefato proposto performa na resolução do problema (escala de desempenho) e, por fim, (vi) comunicação. O estágio (iii) será desdobrado ainda neste capítulo, o estágio (iv) será endereçado no capítulo 4, contemplando, então, o escopo metodológico para a validação do artefato, os resultados de sua aplicação e os endereçamentos necessários para os estágios (v) e (vi). Destaca-se, ainda, que os estágios (i) e (ii) foram abordados na Introdução.

3.2. Proposta de artefato

O artefato proposto é um framework prático e prescritivo, desenvolvido para a seleção de ativos críticos no planejamento e execução de rotinas de manutenção em sistemas complexos. Ele vem ao encontro da necessidade da propositura de modelos que abordem a subjetividade e as importâncias relativas dos fatores de risco. Para atingir esse objetivo, uma abordagem integrada está sendo aplicada, consistindo numa ferramenta prática e adaptável para outros problemas dentro do contexto de manutenção. A ferramenta orienta o usuário na sistemática de levantamento e classificação de critérios avaliativos, uma vez que os ativos a serem avaliados já foram selecionados. Após essa estruturação, a ferramenta define um mix de modelos, incluindo inteligência artificial e abordagens multicritério, para classificar os ativos analisados, orientando, assim, a tomada de decisão. Para o desenvolvimento desse artefato, algumas etapas foram conduzidas, as quais estão sintetizadas na Figura 3.

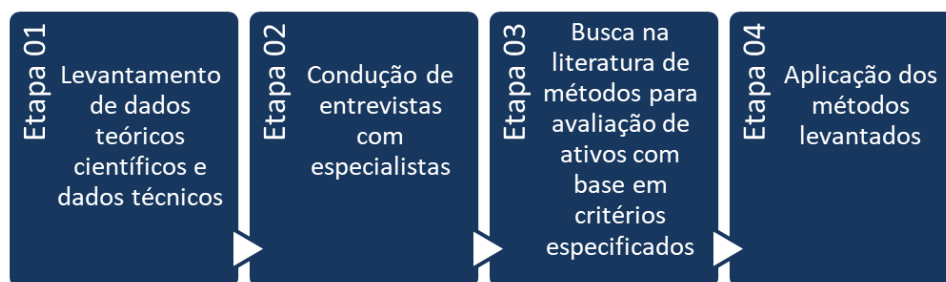


Figura 3 - Macro etapas da pesquisa para construção do framework prático

As etapas 01 e 02 são detalhadas na seção 3.2.1 e tratam especificamente do levantamento dos critérios, validação e classificação dos mesmos. A etapa das entrevistas ainda compreende uma etapa importante que é a avaliação dos critérios para o cálculo dos pesos, conforme detalhado na seção 4.3. A etapa 03 compreendeu buscas na literatura de métodos de avaliação de ativos com base em critérios, esta etapa foi empreendida nas bases de dados eletrônicas *Scopus* e *Web of Science*. Após a identificação dos métodos, foram selecionados os mais aderentes à proposta, conforme justificativa exposta na seção 3.2.2.2.

3.2.1. Seleção e descrição dos ativos

A premissa fundamental para a seleção de ativos é que eles façam parte de um sistema complexo, considerando diversos critérios com níveis distintos de importância, que se conectam com as falhas potenciais que os mesmos possam apresentar. A seleção visa identificar ativos que apresentem desafios significativos relacionados à manutenção, priorizando aqueles mais pertinentes em função de limitações de recursos, como tempo, mão-de-obra e capital. Essa abordagem, alinhada à metodologia DSR, busca garantir a relevância dos ativos para a avaliação no contexto específico (GREGOR; HEVNER, 2013).

Após a etapa de seleção, é crucial descrever os ativos do ponto de vista funcional, identificando suas funções principais, modos de falha associados e os efeitos de falha. A função principal de um sistema representa sua razão fundamental de existir, enquanto os modos de falha indicam condições específicas em que o sistema pode falhar em cumprir sua função. Os efeitos de falha materializam-se como impactos negativos ou alterações no desempenho do sistema, variando em gravidade (ERIKSEN; UTNE; LÜTZEN, 2021; KUMARI et al., 2023; SOLTANALI; ROHANI, 2020). Esse levantamento inicial, conforme todas as prerrogativas descritas, equivale-se às etapas (i) e (ii) da ferramenta FMEA (KUMARI et al., 2023), abordada na seção 2.3, e deve ser feito de maneira estruturada para

garantir clareza para, então, avançar para a etapa de avaliação desses ativos, propõe-se que as informações obtidas sejam registradas conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Proposta de estruturação das informações referente à seleção de ativos

Função principal	Modo(s) de falha	Efeito(s) de falha
<i>Descrição da função da função principal</i>	Modo de falha ₁	Efeito de falha ₁
	Modo de falha ₂	Efeito de falha ₂
	...	...
	Modo de falha _n	Efeito de falha _n

3.2.2. Avaliação de ativos

No contexto da seleção de ativos para a aplicação do framework, é crucial reiterar a premissa central: a intenção é escolher sistemas mais críticos sob a perspectiva de manutenção. Considerando, portanto, que essa máxima foi observada conforme seção 3.2.1, é necessário realizar a avaliação dos ativos, conforme a metodologia norteadora dessa pesquisa, RCM, mais precisamente, a ferramenta FMEA.

A avaliação de ativos proposta nesta pesquisa abrange os passos (iii) e (iv) da ferramenta FMEA (Gupta & Mishra, 2017; Kumari et al., 2023). Este processo envolve determinar a pontuação dos modos de falha com base nos fatores de risco S, O e D, e, em seguida, agregar essas pontuações para obter um número de prioridade de risco (RPN). Estas prioridades de risco são posteriormente ranqueadas consoante os riscos subjacentes. A novidade nesta pesquisa é a introdução de uma abordagem integrada, utilizando o HFIS para catalogar os fatores associados aos modos de falha. Esta abordagem considera o dinamismo do ambiente (caráter hierárquico) e a subjetividade nas avaliações de especialistas (Sistema inferencial fuzzy). Cada um dos parâmetros de falha S, O e D possui pesos distintos, calculados através do modelo multicritério BWM. O desempenho de cada parâmetro é obtido pelo método fuzzy VIKOR. Após essas etapas, o desempenho agregado dos parâmetros, designado como RPN, é calculado mediante um novo sistema SIF, proporcionando uma classificação de prioridade para os

modos de falha, visando facilitar a tomada de decisão. Com esta abordagem, espera-se não apenas cumprir os requisitos convencionais, mas também avançar na eficiência e eficácia da avaliação de ativos dentro do contexto de manutenção.

3.2.2.1. Seleção e classificação de critérios avaliativos

O levantamento de critérios é uma etapa crítica do modelo, visto que se os critérios não forem representativos, induzirá na seleção de ativos indesejáveis, ou seja, que, na prática não agregarão valor para o processo de manutenção, podendo incorrer em manutenção de ativos não críticos em detrimento dos críticos. Portanto, como o objetivo é delinear um modelo que tenha viabilidade e confiabilidade, uma visão multiperspectiva e abrangente será adotada, a fim de diminuir os vieses na seleção desses critérios, qual seja, triangulação de fontes de dados (HEALE; FORBES, 2013; THURMOND, 2001). Triangulação é uma estratégia na pesquisa que envolve a utilização de diversas fontes de dados, pesquisadores, teorias ou métodos para assegurar que os dados, análises e conclusões de um estudo de pesquisa sejam abrangentes e precisos (HEALE; FORBES, 2013; MOON, 2019; THURMOND, 2001). Nessa seara, destaca-se que a coleta de dados qualitativos, cujo caráter é mais amplo e complexo, e, por conseguinte, menos precisos que os dados quantitativos, demanda triangulação.

Para a problemática de gestão da manutenção para ativos complexos, três fontes de dados devem ser consideradas, quais sejam: opiniões de especialistas do setor, documentação técnica (regulatório-normativa) e literatura para coletar dados já validados por aplicações com rigor científico. Elegeu-se que os métodos para a coleta desses dados sejam entrevistas semiestruturadas para coleta de opinião de especialistas, visto que possibilita uma melhor compreensão das perspectivas dos participantes, considerando suas competências técnicas individuais (ADEOYE-OLATUNDE; OLENIK, 2021), análise documental para extração de informações relevantes de documentos técnicos, uma vez que se mostra útil para descobrir e descrever padrões de um fenômeno (SANKOFA, 2022) e, por fim, revisão de escopo (detalhamento no **Erro! Fonte de referência não encontrada.**), que consiste na operacionalização de cinco passos, quais sejam: i) Identificação da pergunta de pesquisa; ii) Identificação de estudos relevantes; iii) Seleção dos estudos; iv) Mapeamento de dados; e, por fim, v) Agrupamento, resumo e relato dos resultados, para sistematizar as informações relevantes da literatura, pois essa abordagem possibilita a identificação de evidências em um determinado campo por meio de mapeamento de conceitos-chave (ARKSEY; O'MALLEY, 2005; MUNN et al., 2018).

A entrevista semiestruturada é uma abordagem de coleta de dados qualitativos, proporcionando flexibilidade e profundidade nas respostas dos participantes. Nesse método, o pesquisador possui um roteiro de perguntas predefinido, mas tem a liberdade de explorar tópicos emergentes com base nas respostas do entrevistado. Essa abordagem permite uma compreensão holística e contextualizada do fenômeno estudado, enriquecendo a pesquisa qualitativa com insights detalhados e nuances que podem não ser capturados por métodos mais rígidos (ADEOYE-OLATUNDE; OLENIK, 2021; MAGALDI; BERLER, 2020).

A condução de uma entrevista semiestruturada perpassa seis etapas principais segundo (ADEOYE-OLATUNDE; OLENIK, 2021), são elas: (i) definição do número de entrevistados e recrutamento dos mesmos; (ii) desenho da coleta de dados, ou seja, desenvolvimento de um protocolo de entrevista semiestruturado, além da coleta de informações demográficas dos participantes; (iii) condução da entrevista, transcrição e transmissão e armazenamento de dados; (iv) análise dos dados; (v) conclusões e (vi) divulgação dos resultados.

A metodologia de análise documental fornece uma abordagem sistemática para a coleta e interpretação de informações contidas em documentos escritos, sejam eles textos oficiais, relatórios, correspondências ou registros históricos. Através dessa abordagem, busca-se identificar padrões, tendências e informações relevantes que possam contribuir para a compreensão aprofundada do fenômeno em estudo. O processo consiste na condução das seguintes macro-etapas: (i) seleção de documentos pertinentes ao tema de pesquisa; (ii) análise, categorização e interpretação dos dados contidos nesses documentos (BOWEN, GLENN, 2009; DELLERMANN et al., 2019).

Destaca-se também que as entrevistas com especialistas, além de captar as informações referentes aos critérios, também consistiu num meio de validar as informações obtidas através da análise documental e mapeamento da literatura. Adicionalmente, esse instrumento também foi utilizado para categorizar cada um dos critérios levantados nos parâmetros de falha S, O e D. Os quais passaram pela etapa de validação, a saber: análise de frequência (STEMLER, 2004).

3.2.2.2. Avaliação dos ativos com base nas análises dos critérios

A avaliação de ativos consiste no cerne do framework proposto, pois compreende várias etapas de análise, as quais adveem da aplicação de métodos estruturados, cujos

resultados são construídos à medida que as etapas vão sendo percorridas. As primeiras etapas consistem na seleção e descrição de ativos, seção 3.2.1.

Superada as etapas de seleção de ativos e de levantamento dos critérios avaliativos para uma problemática de interesse, a primeira etapa de análise deve ser operacionalizada. Esta consiste numa avaliação de desempenho dos ativos selecionados com base em determinados critérios. Para isso, a proposta é que essa avaliação seja feita com base em conhecimentos técnicos, provenientes de especialistas e da literatura disponível. O modelo HFIS, seção 2.4.5, é indicado para aplicar essa base de conhecimentos para determinar os critérios avaliativos mais representativos para o domínio estudado e a base de regras ideal para avaliação dos mesmos, tendo como resultado uma avaliação de ativos com base nos critérios dos subníveis identificados, para cada um dos parâmetros de falha (S, O e D), preconizados no FMEA.

Após essa etapa é imperativo, para a abordagem proposta, fazer uma diferenciação entre os critérios avaliativos, uma vez que possuem níveis de importância diferentes dentro do domínio estudado. Essa distinção deve emergir do crivo de especialistas, haja vista que possuem um conhecimento especialista sobre a interação do critério no ativo. Nesse sentido, as entrevistas cumprem um papel essencial para a captação dessas informações, bem como a definição do método a ser utilizado para refinar as informações obtidas, transformando-as em pesos que sejam representativos. Para esse caso, o método BWM foi selecionado, seção 2.5, pois é um método multicritério que se destina para esse fim, com um desempenho superior em relação aos métodos clássicos, como o AHP (REZAEI, 2015). É ainda nessa etapa de diferenciação dos critérios, que se recomenda incluir os demais critérios de avaliação, referentes aos outros níveis de análises, a fim de cumprir com a abordagem multinível desejada.

A condução dessas etapas gera uma matriz de desempenho x peso, que atribui a cada ativo analisado (linha), uma classe (alto, médio, baixo), obtida pelo HFIS. Nas colunas são dispostos os critérios avaliativos e seus respectivos pesos obtidos pelo BWM. Considerando o resultado dessa matriz é necessário empreender uma análise intermediária identificando o desempenho de cada um dos ativos analisados. Caso exista mais de um ativo com o mesmo desempenho, recomenda-se criar clusters, conferindo a cada um dos clusters um rótulo do desempenho dos ativos contidos nele. Essa etapa é importante, pois consiste em um pré-tratamento para o método de análise conjugada.

Posteriormente, há uma necessidade de realizar uma nova avaliação dos ativos conjugando a avaliação inicial (critérios avaliativos x ativos) e os seus respectivos pesos. Essa etapa deve ser conduzida de modo sistematizado, conforme as avaliações

anteriores. Para isso, o método fuzzy VIKOR foi selecionado, pois apresenta soluções viáveis, mais próximas da solução ideal, posicionando-as em um ranking, da solução mais próxima do ideal (primeira posição), até a mais distante (última posição). A partir disso, considerando essa métrica de distância, é possível calcular os valores e categorizar o desempenho novamente com base nas classes definidas (alto, médio, baixo). Até o presente momento, todas as análises foram realizadas para cada um dos parâmetros de falha (S, O e D). Por fim, é necessário obter uma classificação final de cada um dos ativos considerando o desempenho do mesmo em todos os parâmetros de falha (S, O e D). Para isso, indica-se que seja utilizado um novo HFIS.

4. Estudo empírico

A presente pesquisa é fruto de um projeto colaborativo conduzido pelo Instituto Tecgraf – Grupo de Engenharia Digital juntamente com os departamentos de Engenharia Industrial, Engenharia Civil e uma grande empresa de O&G. Numa visão alto nível, o cerne do projeto consiste em fornecer soluções para as rotinas de manutenção que visem à mitigação da corrosão, mediante abordagens sistematizadas. Até o momento, esse projeto resultou em uma dissertação de mestrado, uma tese de doutorado e dois artigos científicos, intitulados *Fuzzy Criticality Assessment of Systems External Corrosion Risks in the Petroleum Industry—A Case Study* (POLONIA RIOS, 2023) e *Análise do comportamento da corrosão externa em plataformas de petróleo utilizando o modelo de Random Forest* (ELMAS, 2022). Embora essas pesquisas tenham endereçado problemáticas relevantes para a empresa supracitada, ainda assim, ficou comprovada a necessidade de uma abordagem mais específica para determinados ativos. TVFs (Tubulações, válvulas e flanges) são recursos operacionais críticos, pois consistem em um sistema composto que concentram atividades operativas relevantes dentro do contexto de processamento e armazenamento de petróleo, responsáveis pelo transporte, processamento e distribuição de fluidos. Em virtude disso, a proposta da presente pesquisa é realizar um estudo de caso, na abordagem desenvolvida, a fim de investigar a criticidade desses ativos e gerar para o planejador uma recomendação de priorização de TVFs a serem inspecionados/reparados, em razão da corrosão externa.

O framework proposto foi obtido após a condução das etapas descritas na seção 3 e pode ser sumarizado na Figura 4. Cada uma dessas etapas será operacionalizada através do presente estudo empírico, que consiste em um instrumento de validação.

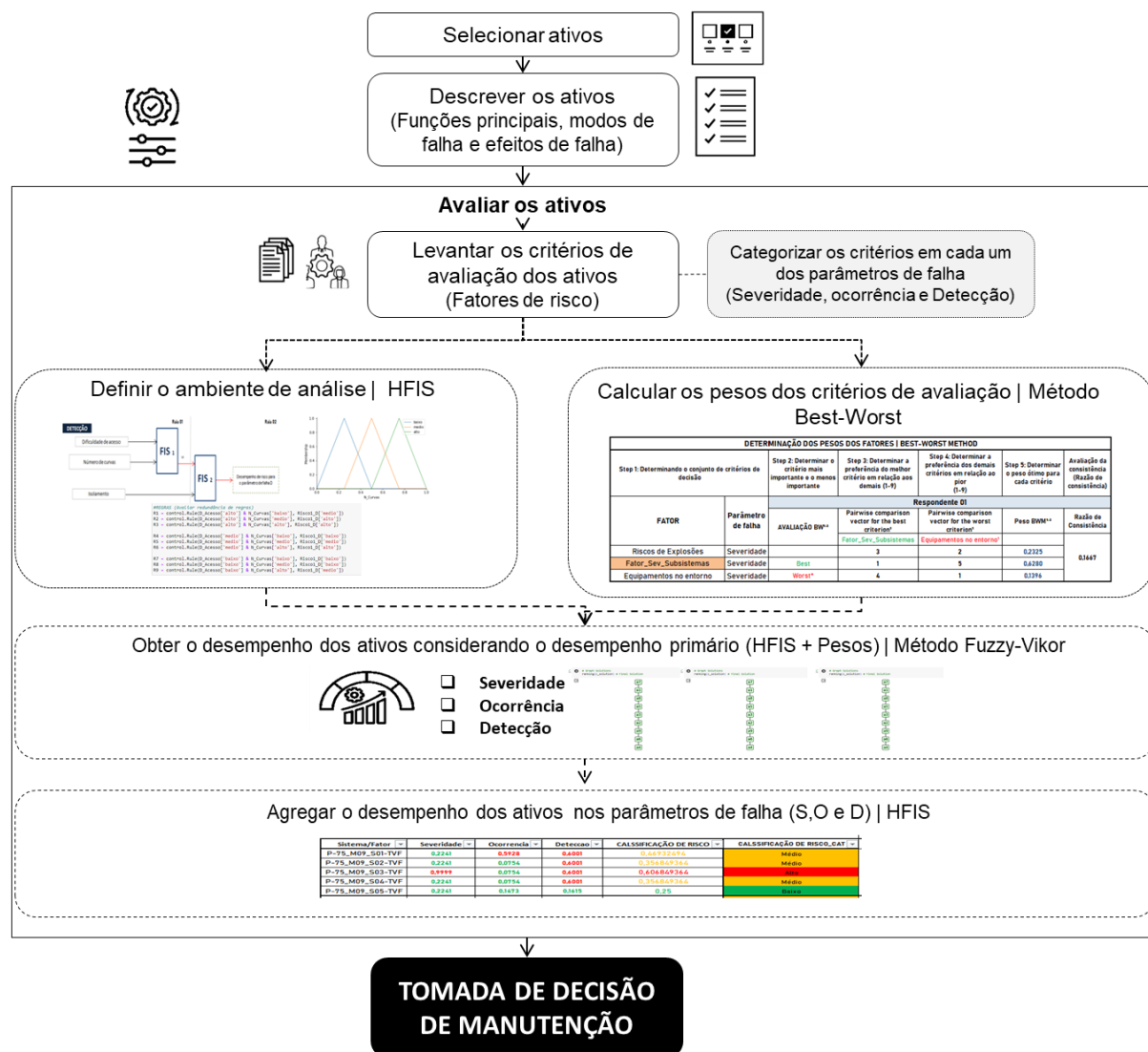


Figura 4 - Framework prático proposto para seleção e avaliação de ativos

O estudo de empírico proposto nessa seção consiste na aplicação do framework prático (artefato), e, conforme supracitado, possui finalidade avaliativa, conforme preconiza a metodologia DSR, abordada na seção 3.1. Em linhas gerais, um estudo empírico consiste em uma investigação detalhada, que compreende coleta de dados e investigação de fenômenos com o propósito de compreender uma classe maior de unidades (semelhantes) (CASSEL; SYMON, 2004; GERRING, 2004). Para o presente estudo, uma plataforma FPSO (floating, production, storage and offloading), definida como um navio que possui capacidade para processar e armazenar o petróleo e prover a transferência do petróleo e/ou gás natural (PETROBRAS, 2022), foi adotada.

Essa plataforma é composta por 32 módulos que podem ser classificados como módulos de produção, que concentram a produção de O&G, módulos gerais, que concentram as atividades referentes à operação do navio e atividades de pessoal. Cada um dos módulos é organizado, do ponto de vista espacial, em setores, a fim de facilitar a localização dos ativos que neles se localizam. A Figura 5 ilustra a subdivisão espacial da plataforma analisada.

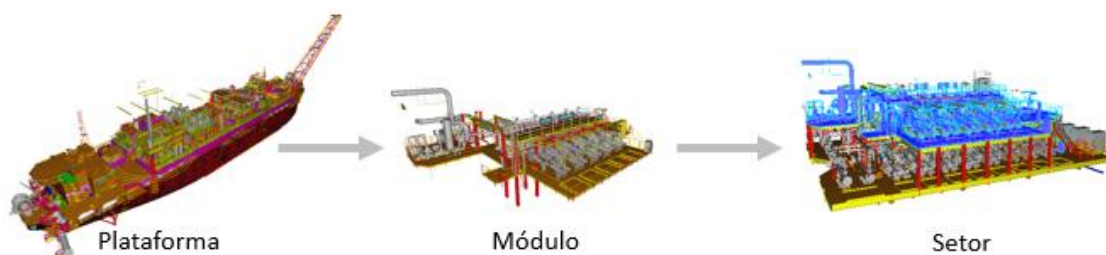


Figura 5 - Ilustração da subdivisão de uma unidade FPSO

Os ativos de inspeção/manutenção, pertencentes aos módulos, são identificados a partir de suas respectivas localizações dentro dos módulos – setores. Esses ativos podem ser definidos, de maneira ampla, como entes que possuem funcionalidades específicas, podendo atuar diretamente no processo produtivo, como, por exemplo, equipamentos e TVFs, ou viabilizá-los, como suportes, por exemplo. Estes ativos são: (i) teto, (ii) tubulações, válvulas e flanges, (iii) estruturas, (iv) suportes, (v) equipamentos, (vi) guarda-corpo, (vii) escadas; (viii) antepara e (ix) piso. Para a presente pesquisa, conforme justificado, o sistema TVF, representado na Figura 6, foi considerado analisado.

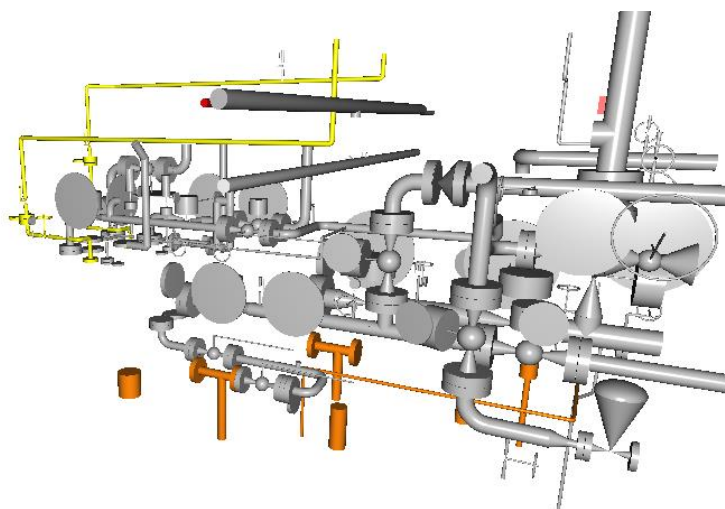


Figura 6 - Representação de um sistema TVF

Uma tubulação pode ser definida como uma estrutura composta por tubos e acessórios ou componentes de tubulação, projetados para, a partir da convergência de suas especificações, transportar, distribuir, misturar, separar, descarregar, controlar e medir fluxos de fluidos líquidos ou gasosos. Um sistema de tubulações, portanto, designa um conjunto de tubulações interligadas, com a mesma função e sujeitas às mesmas condições de projeto, ou seja, fluido, pressão e temperatura iguais ou muito similares (ASME B31.3,2020).

Um sistema de tubulações, compostos por tubulações, flanges e válvulas é classificado como um sistema complexo, pois o desempenho de sua função depende do alinhamento técnico do desempenho dos demais itens que o compõem. Portanto, para a avaliação desse tipo de ativo, é imperativo empreender uma análise multinível, reafirma-se, uma vez que, definir a criticidade desse ativo, sem uma análise mais aprofundada, requer níveis de abstrações que podem incorrer em análises não representativas. A proposta do framework fruto dessa pesquisa visa avaliar a criticidade de ativos complexos, a partir de uma análise multinível (subsistemas), a fim de obter classificações representativas de ativos de mesma natureza.

Os conjuntos de tubulações que foram analisados localizam-se nos módulos denominados: (i) Manifold - M09, (ii) Área de Carga (M16), (iii) Offloading (M23) e (iv) Piperack (M24), por serem representativos no contexto analisado. Os módulos M09, M23e M24 são módulos de produção e o M16 um módulo geral. Destaca-se que, embora o módulo geral não concentre função produtiva, possui passagem de tubulações. Para cada TVF analisado no estudo, foram mapeados os conjuntos, também denominados subsistemas, que os compõem, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Número de subconjuntos contidos em cada ativo TVF

Ativo	Localização	Número de Subsistemas
TVF	M09	1386
	M16	452
	M23	270
	M24	867

Esses números de subsistemas são resultantes de um processo de limpeza da base de dados e, portanto, todos foram considerados no modelo de avaliação do ativo analisado. Esse processo consistiu na eliminação de subconjuntos cujos líquidos circulantes não possuíam correspondência na base de tipos de fluidos fornecida pela empresa e os subconjuntos que não tinham preenchimento de dados indispensáveis para a análise (discriminados na 4.1.3).

Cada subsistema é identificado por um código, cuja lei de formação é composta por três blocos de informações, conforme Tabela 3. O primeiro bloco refere-se ao tipo de fluido circulante, o segundo ao conjunto de especificações técnicas (tipos de materiais, tolerância à corrosão, faixa de temperatura, tipos de componentes do subsistema e dimensões dos mesmos) e, por fim, a localização do conjunto.

Tabela 3 – Informações atinentes ao subsistema conforme lei de formação

Subsistema	Localização	Fluido	Tolerância à Corrosão	Faixa de Temperatura	Componente	Tipo de Material	Dimensão
BG-B10H-6046	Região de carga do Main Deck	Gás Inerte	1,6 mm	0°C -240°C	Válvula Global	Aço Carbono	12" x 6"
					2 Falnges	Aço Carbono	6" x 12"
					2 Tubulações	Aço Carbono	12" x 6"
					Cotovelo 90°	Aço Carbono	6"

A partir desses dados, é possível inferir informações importantes para a análise de criticidade de cada um desses ativos, pois essas especificações analisadas em conjunto são o que distingue um subconjunto de outro.

4.1. Seleção e classificação dos fatores de corrosão

4.1.1. Seleção da literatura e de documentos técnicos

No bojo da atuação *offshore*, no que se refere ao fenômeno corrosivo, que, conforme preluído anteriormente é um processo ambivalente, influenciado por uma variedade de fatores,

faz-se necessário mapear quais desses fatores (critérios) são os mais relevantes na perspectiva da atividade *offshore* em indústrias de O&G para o ativo TVF. Para isso, dados teóricos, científicos e técnicos foram coletados, respectivamente, através da condução de uma revisão de escopo (Apêndice A) e análise documental de documentações técnicas, derivadas de normas nacionais e internacionais aplicáveis ao setor. A Tabela 4, abaixo, concentra os fatores que afetam a corrosão externa, tanto em relação à sua geração e identificação, quanto às consequências potenciais.

Tabela 4 -Fatores de risco associados à corrosão

FATOR	FONTE PRINCIPAL
Temperatura	(BENSON et al., 2021; CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESET, 2010; MAHMOODZADEH et al., 2020)
Pressão	(BENSON et al., 2021; CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESET, 2010; MAHMOODZADEH et al., 2020)
Contaminantes	(ANIMAH; SHAFIEE, 2018; LI et al., 2017; MAHMOODZADEH et al., 2020)
Impacto ambiental	(CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESET, 2010; LI et al., 2017)
Tipo de cobertura	(LI et al., 2017)
Interrupção da produção	Documentação Interna baseada na Resolução nº 43 da Agência Nacional do Petróleo, gás natural e Biocombustíveis (ANP, 2009)
Impacto ambiental	Documentação Interna baseada na Resolução nº 02 da Agência Nacional do Petróleo, gás natural e Biocombustíveis (ANP, 2010)
Tipo de fluido	Documentação Interna Documentação Interna baseada na Resolução nº 02 da Agência Nacional do Petróleo, gás natural e Biocombustíveis (ANP, 2010)
Condições de iluminação	(BENSON et al., 2021)
Classe de material	(CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESET, 2010)
Dificuldade de acesso	(BENSON et al., 2021)
Risco de explosões	(BENSON et al., 2021)

Todos os fatores foram analisados sob dois paradigmas, avaliação de especialistas e viabilidade de análise dos fatores.

4.1.2. Seleção com especialistas (Entrevistas)

A etapa de entrevistas com especialistas foi realizada após a coleta de dados da literatura e de documentação técnica e objetivou: (i) levantar novos critérios relacionados à corrosão externa para a avaliação de ativos, (ii) validar os critérios já obtidos pelos outros meios, (iii) classificá-los conforme os fatores de risco severidade (S), ocorrência (O) e detecção (D) da ferramenta FMEA, (iv) definir as lógicas de análise de cada um dos critérios (*regras if-else*) e, por fim, (v) definir os graus de importância de cada um dos critérios (pesos).

Para essa etapa, oito (8) especialistas foram selecionados para a entrevista, cujos perfis subdividiam-se em níveis de experiências distintos em áreas que se associam à gestão da corrosão (inspeção, manutenção e planejamento), conforme sumariza a Tabela 5.

Tabela 5 – Informações demográficas dos participantes entrevistados

Especialista	Posição	Área de experiência
1	Nível Sênior	Experiência em inspeção de corrosão
2	Nível Sênior	Experiência em gerenciamento de corrosão
3	Nível Sênior	Experiência em pesquisa e gerenciamento de corrosão
4	Engenheiro de Produção	Líder da equipe de manutenção
5	Técnico Mestre	Experiência em inspeção de corrosão
6	Nível Mestre	Experiência em integridade de ativos
7	Nível Sênior	Experiência em gerenciamento de corrosão
8	Técnico Mestre	Experiência em inspeção de corrosão

Cada uma das entrevistas possuíam estruturas iguais, e foram divididas em dois momentos, o primeiro visou fornecer ao entrevistado um *overview* da pesquisa, apresentando os conceitos de criticidade, os critérios levantados, cada uma das dimensões de classificação de modos de falha S, O e D e os exemplos de regras *if else* para classificação de ativos em criticidade baixa, média ou alta em relação cada um dos critérios apresentados. O segundo momento da entrevista visou operacionalizar cada uma das etapas apresentadas. Portanto, cada entrevistado julgou se concordava ou discordava do critério apresentado (validação) e se acrescentaria critérios adicionais (seleção), de acordo com cada uma de suas respectivas experiências. Adicionalmente, cada um dos entrevistados foi

orientado a alocar os critérios nas dimensões S, O e D, atribuindo-lhes pesos, e, por fim, foram formuladas as regras *if else*.

As entrevistas foram realizadas de forma virtual, com duração média de 2h, através da plataforma Google Meet, por ser uma plataforma de videoconferência gratuita e, portanto, acessível. Destaca-se ainda que essa etapa da entrevista foi conduzida com o auxílio do *software Microsoft Excel* para organizar as informações e facilitar a posterior análise do conteúdo das entrevistas. Por fim, ressalta-se que as respostas de cada uma dessas entrevistas foram analisadas conforme os paradigmas metodológicos propostos. Na Tabela 6 é possível visualizar a consolidação dos novos critérios de avaliação obtidos com os especialistas.

Tabela 6 – Novos fatores apontados por especialistas

Fatores	Entrevistados							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Umidade do componente	x							
Número de conexões	x	x	x	x		x	x	x
Área de trânsito			x					
Contaminantes químicos			x					
Presença de itens soldados	x	x	x	x		x	x	x
Condensação permanente				x				
Tipo de cobertura	x	x	x	x		x	x	x
Avaliação de Auditoria					x			
Isolamento térmico			x	x		x		
Dificuldade de acesso	x	x	x	x	x	x	x	x
Habitabilidade da plataforma					x			
Número de curvas	x	x	x	x	x	x	x	x
Segurança operacional						x		
Campo de visão							x	

Nessa seção pretende-se apenas apresentar os fatores levantados, na seção 4.1.3, apresentar-se-ão os fatores selecionados, com base em dois crivos, o de consenso e o de disponibilidade de dados.

4.1.3. Classificação de fatores

Após a coleta dos fatores de corrosão externa, os mesmos foram submetidos a um processo de avaliação pelos especialistas, a fim de garantir que seria possível realizar a análise do ativo selecionado e que essa avaliação seria representativa da realidade operacional observada na plataforma (premissa de consensuação). Observa-se na seção

4.1.3, que os fatores provenientes da literatura e/ou documentação técnica foram avaliados de maneira diferente dos fatores sugeridos pelos especialistas. Para estes, se mais de um especialista indicasse um fator, o mesmo passaria por processo de pesquisa na literatura e se fosse localizado embasamento teórico, entraria na amostra, se não seria descartado, para aqueles, aplicou-se a regra da consensuação através do método de frequência relativa (MCINTOSH; MORSE, 2015). Os fatores cujas frequências relativas fossem maiores que 75% foram considerados consensos e passaram a conter a amostra (STEMLER, 2004). Os dados resultantes dessa etapa estão sumarizados na **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

Nessa mesma entrevista, aos especialistas foi solicitado que categorizassem os fatores nos parâmetros de severidade (S) - consiste no impacto da falha, ocorrência (O) - Consiste na probabilidade da falha e detecção (D) - consiste na identificação da falha). Para os fatores analisados na dimensão de subsistemas, os fatores (i) pressão, (ii) temperatura e (iii) tipo de fluido foram categorizados no parâmetro de falha severidade. Os fatores (iv) número de conexões, (v) presença de itens soldados, (vi) classe do material e (vii) tipo de cobertura foram categorizados no parâmetro de falha ocorrência e, por fim, os fatores (viii) dificuldade de acesso, (ix) número de curvas e (x) isolamento térmico foram categorizados no parâmetro de falha detecção.

Tabela 7 -Fatores selecionados para avaliação de criticidade dos sistemas TVF

RESUMO (CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO)												
CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	FONTE PRIMÁRIA	ENTREVISTADOS								Concordância (%)	Discordância (%)	Nível de Avaliação
		1	2	3	4	5	6	7	8			
Classe do material	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Tipo de cobertura (Revestimento)	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Condições de Iluminação	Literatura	X	x	x	X		X	x	x	87,50%	12,50%	Sistema
Dificuldade de Acesso	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Temperatura (Altas temperaturas)	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Incidência de vento	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Sistema
Temperatura (Ambiente)	Literatura	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Sistema
Pressão	Literatura + Documentação técnica	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Impacto Ambiental	Documentação Técnica	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Sistema*
Riscos de Explosões	Literatura + Documentação técnica	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Sistema
Interrupção da produção	Documentação Técnica	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Sistema*
Tipo de fluido (Vazamentos)	Documentação técnica	X	x	x	X	x	X	x	x	100,00%	0,00%	Subsistema
Umidade do componente	Especialistas	X								Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Contaminantes químicos	Especialistas			x						Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Condensação permanente	Especialistas				X					Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Avaliação de auditoria	Especialistas					x				Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Segurança operacional	Especialistas						X			Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Campo de visão	Especialistas							x		Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Consequências normativas	Especialistas							x		Sugerido apenas por de um especialista		Não avaliado
Número de conexões	Especialistas	X	x	x	X		X	x	x	Sugerido por mais de um especialista		Subsistema
Presença de itens soldados	Especialistas	X	x	x	X		X	x	x	Sugerido por mais de um especialista		Subsistema
Isolamento térmico	Especialistas			x	X		X			Sugerido por mais de um especialista		Subsistema
Equipamentos no entorno	Especialistas	X	x	x	X	x	X	x	x	Sugerido por mais de um especialista		Sistema
Número de curvas	Especialistas	X	X	X	X	X	X	X	X	Sugerido por mais de um especialista		Subsistema

Portanto, os fatores selecionados para a avaliação de criticidade dos ativos TVF, na abordagem multinível, ou seja, a partir da criticidade dos subsistemas que os compõem, são: (i) Tipo de fluido, (ii) Tipo de material, (iii) Tipo de cobertura, (iv) Isolamento térmico, (v) Temperatura da superfície, (vi) Pressão, (vii) Número de conexões, (viii) Presença de itens soldados, (ix) Dificuldade de acesso e (x) Número de curvas.

- TIPO DE FLUIDO

O tipo de fluido que se movimenta nas tubulações pode agravar a corrosão de um metal, em virtude de suas propriedades dinâmicas. Essas propriedades, portanto, promovem ações corrosivas que derivam do próprio movimento do fluido e do material metálico do qual é feita a tubulação, o que promove perda desse material. Esse fator, à primeira vista, pode denotar uma natureza ambivalente, pois se associa tanto à corrosão interna quanto à externa. No entanto, em relação à externa figura como um agravante do processo corrosivo, pois uma vez que as tubulações offshore localizam-se em um ambiente adverso, o afinamento das paredes das tubulações aumenta o potencial das consequências do efeito corrosivo, podendo gerar perfurações e, por conseguinte, vazamentos (GENTIL, 2017).

Importa, pois, destacar que o tipo de fluido se constitui como um fator determinante na taxa de deterioração de ativos offshore (AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, 2009). Para a problemática analisada, o tipo de fluido relaciona-se ao tipo de serviço executado pelas tubulações, em virtude disso, identificar quais os potenciais de riscos dos possíveis fluidos circulantes no contexto de manutenção são relevantes.

-TIPO DE MATERIAL

Segundo Ratnayake e Markeset, (2010), os tipos de materiais das linhas de fluxo, interagindo com o ambiente marinho (água, ar, sais, temperatura e umidade, por exemplo), tendem a compor um cenário propício para o processo corrosivo. Noutras palavras, essa conjuntura se materializa em virtude do efeito interativo da composição química dos materiais e o meio (LIU et al., 2018). (CAI et al., 2018a) corrobora esse entendimento, enunciando que os diferentes tipos de materiais sob a influência de fatores ambientais, como o ambiente marinho, são susceptíveis, cada qual ao seu nível, à corrosão atmosférica e marinha e, por conseguinte, aos seus efeitos, caso não sejam gerenciadas.

Considerando, pois, os tipos de materiais presentes nos conjuntos de tubulações das unidades produtivas da indústria de O&G em questão, os mesmos podem ser sumarizadas em 4 (quatro) categorias, a saber: (i) Aço carbono; (ii) Aços inoxidáveis; (iii) Cobre e ligas de cobre; (iv) Ferros; (v) Aço de média e baixa liga; (vi) Níquel e ligas de níquel e (vii)

Não- metálico. Há vários tipos de corrosão, para os efeitos de análise de falhas abordados nessa pesquisa, a corrosão marinha será a referência adotada. (GENTIL, 2017) aborda o uso da tabela prática em água do mar para dispor metais e ligas de acordo com seus potenciais medidos em meio corrosivo, podendo, portanto, ser aplicado para análise de corrosão, uma vez que considera as possíveis reações entre metais e água e metais e ácidos.

- TIPO DE COBERTURA

A cobertura de ativos configura-se como uma técnica de proteção, que controla a corrosão (NAGALAKSHMI; SIVASAKTHI, 2019; REVIE; UHLIG, 2008), pois cria uma barreira entre o metal e o meio em que se localiza (AMADI; UKPAKA, 2014), sendo assim uma temática relevante dentro do contexto de gestão da corrosão. (ALAMRI, 2020) aponta que o caráter protetivo dessa técnica advém da mitigação da atuação de fatores atmosféricos no metal, mas para isso a cobertura selecionada deve seguir os requisitos de temperatura, condições de umidade e outros fatores ambientais. Os tipos de cobertura podem ser classificados como coberturas metálicas, coberturas orgânicas e coberturas inorgânicas, cada qual para um tipo de metal específico, a depender, também, do seu respectivo tipo de aplicação (REVIE; UHLIG, 2008).

- ISOLAMENTO TÉRMICO

Isolamento térmico designa a utilização de componentes para retardar a perda de energia térmica em sistemas de produção (YANG; LOURENÇO; ESTEFEN, 2018), mantendo a temperatura adequada do fluido circulante, preservando assim suas características físicas e químicas. Além disso, há isolamentos térmicos cuja função é conferir proteção pessoal aos indivíduos que acessam as instalações produtivas (LIMA, 2018).

Segundo o IBP (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2021), mesmo materiais sob isolamento térmico estão sujeitos aos fenômenos corrosivos, em virtude da concentração de umidade e a possível presença de contaminantes advindos da composição do próprio material da proteção. Esse tipo de corrosão configura-se como um desafio, pois sua detecção é difícil, uma vez que, embora o isolamento esteja em boas condições, numa inspeção visual, ainda assim pode haver a presença de um fenômeno corrosivo que pode levar a falhas inesperadas. Portanto, prescreve-se que a inspeção de corrosão sob isolamento requer a remoção de parte ou todo o isolamento (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS, 2021).

- TEMPERATURA

Retomando a questão de que a corrosão de ativos é resultado da interação entre o seu material e seu ambiente, há nessa conjuntura uma combinação complexa de processos intensos e condições de temperatura/pressão que possibilitam mecanismos diferentes de falha por corrosão (WU et al., 2013). A temperatura é um fator determinante na taxa de variação da corrosão atmosférica (GENTIL, 2017; HORIUCHI; HIHARA, 2015; MAHMOODZADEH et al., 2020) e na formação de filme eletrolítico (CAI et al., 2018b). Muitos dos metais empregados na indústria apresentam suscetibilidade à corrosão quando expostos a agentes oxidantes, ocorrendo assim, uma interação entre metais e oxidantes e nesse processo há liberação de calor, viável em temperaturas mais elevadas (GENTIL, 2017; RIOS, 2023). Para além do fenômeno corrosivo, a temperatura é um fator crítico, pois une dois tipos de possíveis de condições para gerar mecanismos de falha, a corrosão, conforme descrito, mas também, tensões térmicas que geram fadiga no material, incorrendo em falhas de grandes proporções (CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESSET, 2010).

- PRESSÃO

Pressão é uma condição operacional que afeta as reações químicas, relacionando-se com os gases dissolvidos no processo de produção de petróleo (AYAZI; MIRFENDERSKI; MOGHADAM, 2006; MAHMOODZADEH et al., 2020). De acordo com (CHANDIMA RATNAYAKE; MARKESSET, 2010), a pressão na linha de fluxo gera estresse nas paredes do tubo, o que aumenta o risco de falha sob alta pressão na presença de pontos na superfície da linha de fluxo que foram enfraquecidos por corrosão ou geração de microfissuras. Portanto, a pressão, além de ser um fator que pode gerar um processo corrosivo, pode agravar as consequências advindas de uma corrosão já instalada. Portanto, a pressão de operação associada à resistência do material do ativo e os demais fatores já mencionados, relacionam-se com o processo corrosivo que instaurado pode resultar em um pequeno vazamento ou falha de ruptura, conforme modelado por (LI et al., 2023).

-NÚMERO DE CONEXÕES

Entende-se por conexões, acoplamentos designados para conectar tubos em sistemas de tubulação, com vistas a garantir a vedação adequada para suportar a pressão dos fluidos circulantes. Dentre as quais têm-se, por exemplo, roscas, flanges e junções de compressão. O número de conexões constitui-se como um fator importante para ser considerado nesse contexto, devido ao fenômeno de corrosão por frestas. A corrosão em frestas é uma forma de ataque localizado que ocorre mais frequentemente em fissuras estreitas, em virtude da limitação de oxigênio, podendo interferir na integridade de juntas mecânicas em estruturas de engenharia feitas de metais e ligas passivas (BETTS; BOULTON, 2013). O processo de

formação desse tipo de corrosão confirma-se, é viabilizado pela existência de frestas ou lacunas entre duas superfícies de contato, como conexões parafusadas, juntas de flanges e soldas (BETTS; BOULTON, 2013; UHLIG, 2011). Portanto, como consequência lógica do que fora exposto, quanto mais conexões um conjunto de tubulações tiver, mais propensão a esse tipo de corrosão o mesmo estará sujeito.

- PRESENÇA DE ITENS SOLDADOS

A região primária de corrosão externa em tubulações é a área da junta que sofre carbonização no local. O metal na conexão entre diferentes seções do tubo é mais propenso à corrosão, seja devido à zona afetada pelo calor próxima à solda ou à complexidade do sistema de união (AMADI; UKPAKA, 2014). Analogamente ao que foi exposto na seção anterior, na descrição do fator ‘número de conexões’, áreas com soldas tendem a ser mais vulneráveis ao processo corrosivo devido às frestas que permitem uma abertura ao meio, facilitando, portanto, o desenvolvimento desse tipo de fenômeno (GENTIL, 2017).

- DIFICULDADE DE ACESSO

A inspeção visual dos componentes da plataforma configura-se como o principal recurso para identificar a corrosão nesses tipos de ativos. No entanto, nem todos os ativos são facilmente acessíveis, pois podem estar alocados de maneira justaposta ou em elevações diferentes, interferindo, portanto, na detecção do processo corrosivo. Considerando essa problemática, Wu et al. (2013) ao proporem uma metodologia de análise de risco de corrosões em equipamentos, consideraram que a dificuldade de inspeção da corrosão é uma variável que interfere diretamente na probabilidade de falha do ativo. Portanto, seguindo essa linha, os casos críticos, com classificação de risco mais gravosa, são aqueles cujos acessos são mais dificultados.

-NÚMERO DE CURVAS

O número de curvas, na mesma linha do fator ‘dificuldade de acesso’, também remete à dificuldade de inspeção, mas o paradigma é diferente. Nesse fator, a presença de curvas no conjunto de conexões, pode indicar que as linhas de fluxo, ou seja, as tubulações estão percorrendo seções diferentes na plataforma, podendo, assim, dificultar o acesso do inspetor a todos os componentes para inspeção, o que é crítico, conforme corrobora (WU et al., 2013). Além disso, o número de curvas representa um fator agravante, pois modifica o fluxo dos fluidos e sua dinâmica no interior das tubulações, podendo impactar na perda de carga (o que gera oscilações de pressão interna), aumenta o risco de erosão nas paredes internas da tubulação (levando a diminuição da espessura da tubulação) e, pode, também, gerar um aumento da turbulência do fluido, podendo impactar no desgaste e em corrosão nas paredes da tubulação. Embora esses agravantes se apliquem aos casos de corrosão

interna, depreende-se que uma tubulação sujeita a esses tipos de impacto, somada aos desafios de inspeção da corrosão externa, a torna mais susceptível que as demais.

4.2. Construção do ambiente de análise HFIS

Para a construção de um ambiente HFIS, para avaliar os subsistemas através de cada um dos critérios elegíveis, é necessário seguir as etapas propostas pela teoria subjacente abordada na seção 2.4.

Para um sistema de inferência Mandani, utilizado nesta abordagem, a primeira etapa consiste na definição das variáveis de entrada e, em virtude da estruturação lógica, das variáveis de saída. Importa, porém, destacar que para a abordagem norteadora da construção do artefato proposto, ferramenta FMEA do paradigma de manutenção centrada na confiabilidade (RCM), há três parâmetros de falhas que devem ser avaliados e agregados para definir a prioridade de risco das unidades que estão sendo avaliadas, quais sejam S, O e D. Para tanto, serão desenhados três ambientes de análise HFIS, para avaliar cada uma dessas dimensões, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Variáveis de entrada e saída dos ambientes FIS projetados

Variáveis de entrada					Variáveis de Saída
Ambiente HFIS	Parâmetro de falha	HFIS1	HFIS2	HFIS3	
Ambiente HFIS ₁	Severidade	Pressão e temperatura	VI e Tipo de Fluido	-	Classificação de risco do parâmetro S
Ambiente HFIS ₂	Ocorrência	Número de Conexões e presença de itens soldados	VI1 e Classe do material	VI2 e Tipo de cobertura	Classificação de risco do parâmetro O
Ambiente HFIS ₃	Deteção	Dificuldade de acesso e número de curvas	VI 2 e Isolamento Térmico		Classificação de risco do parâmetro D

As variáveis VI, VI₁ e VI₂, consistem nas variáveis intermediárias que conectam os múltiplos FIS de cada um dos ambientes HFIS projetados. A correspondência de cada uma dessas variáveis para as variáveis fuzzy e seus respectivos conjuntos fuzzy seguem lógicas semelhantes. A variável linguística pressão, de natureza contínua, com domínio [0 – 549] corresponde ao critério Pressão e a variável linguística temperatura, de natureza contínua, com domínio [0 – 496] corresponde ao critério Temperatura. A variável linguística tipo de fluido, de natureza categórica nominal, corresponde ao critério Tipo de fluido. Essas variáveis, referentes ao ambiente HFIS do parâmetro severidade, são descritas por três termos linguísticos: Alto, médio e baixo. Cada termo linguístico está associado a um

conjunto difuso triangular, baixo: (0, 0.25, 0.5), médio: (0.25, 0.5, 0.75) e alto: (0.5, 0.75, 1), cuja descrição está sumarizada na Tabela 9.

Tabela 9 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro severidade

SEVERIDADE		
Valor	Descrição	Números fuzzy
Baixo	Efeito mínimo, o ativo sofre uma degradação gradual caso não for reparado, mas não inviabiliza seu funcionamento	(0, 0.25, 0.5)
Médio	Efeito moderado, o sistema não realiza suas funções, mas manter a falha exige interromper as operações	(0.25, 0.5, 0.75)
Alto	Efeito crítico, a manutenção exige que as operações interrompidas, mas manter a falha pode interromper abruptamente as funções do sistema	(0.5, 0.75, 1, 1)

A variável linguística número de conexões, de natureza discreta, com domínio [0 – 59] corresponde ao critério Número de conexões e a variável presença de itens soldados, binária, com domínio [0 – 1] corresponde ao critério Presença de itens soldados.

A variável linguística classe de material, de natureza categórica nominal, corresponde ao critério Classe de material e a variável tipo de cobertura, binária, com domínio [0 – 1] corresponde ao critério Tipo de cobertura. Essas variáveis, referentes ao ambiente HFIS do parâmetro ocorrência, são descritas por três termos linguísticos: Alto, médio e baixo. Cada termo linguístico está associado a um conjunto difuso triangular, baixo: (0, 0.25, 0.5), médio: (0.25, 0.5, 0.75) e alto: (0.5, 0.75, 1), cuja descrição está sumarizada na Tabela 10.

Tabela 10 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro ocorrência

OCORRÊNCIA		
Valor	Descrição	Números fuzzy
Baixo	Probabilidade de falha mínima, podendo ocorrer uma vez a cada dois anos	(0, 0.25, 0.5)
Médio	Probabilidade de falha moderada, podendo ocorrer de 3-5 falhas a cada dois anos	(0.25, 0.5, 0.75)
Alto	Probabilidade de falha alta, podendo ocorrer de 6-10 falhas a cada dois anos	(0.5, 0.75, 1)

A variável linguística dificuldade de acesso, de natureza discreta, com domínio [0 – 129] corresponde ao critério Dificuldade de acesso e a variável linguística presença de número de curvas, também de natureza discreta, com domínio [0 – 47] corresponde ao critério Número de curvas. A variável linguística isolamento térmico, de natureza categórica nominal, corresponde ao critério isolamento térmico e corresponde ao critério Isolamento térmico. Essas variáveis, referentes ao ambiente HFIS do parâmetro detecção, são descritas por três termos linguísticos: Alto, médio e baixo. Cada termo linguístico está

associado a um conjunto difuso triangular, baixo: (0, 0.25, 0.5), médio: (0.25, 0.5, 0.75) e alto: (0.5, 0.75, 1), cuja descrição está sumarizada na Tabela 11.

Tabela 11 - Descrição dos conjuntos fuzzy para o parâmetro detecção

DETECÇÃO		
Valor	Descrição	Números fuzzy
Baixo	Falha identificada pela equipe de manutenção durante inspeções	(0, 0.25, 0.5)
Médio	Falha identificada através de ruídos anormais	(0.25, 0.5, 0.75)
Alto	Falha de difícil identificação, denominada oculta	(0.5, 0.75, 1)

As variáveis intermediárias e as de saída para cada um dos parâmetros de falha também são designadas pelos três termos linguísticos: Alto, médio e baixo e os seus respectivos conjuntos fuzzy triangulares são os mesmos abordados anteriormente. A Figura 7 a representação gráfica do conjunto triangular fuzzy da variável de saída do parâmetro detecção e essa representação é semelhante para as demais variáveis FIS abordadas, tanto as de entrada quanto as de saída.

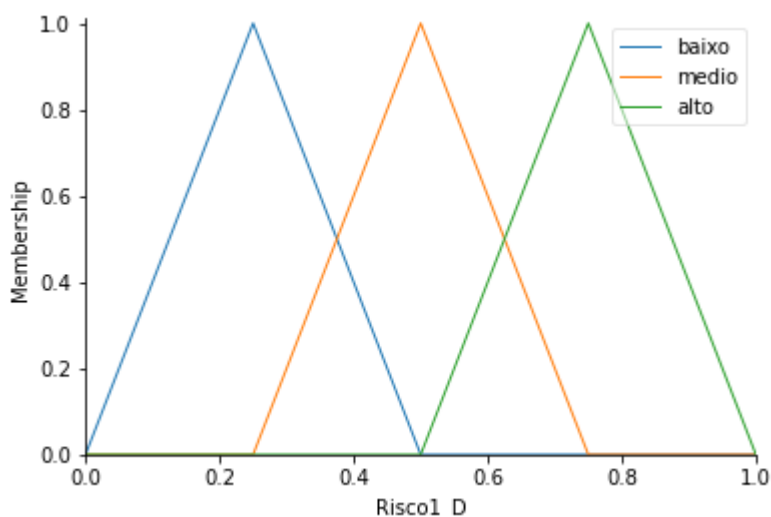


Figura 7 - Conjunto fuzzy triangular para a variável de saída (Detecção)

Os números fuzzy triangulares foram selecionados para essa aplicação, pois são facilmente interpretáveis e são eficazes para representativos para casos reais (KREINOVICH; KOSHELEVA; SHAHBAZOVA, 2018). Esses conjuntos fuzzy estão na forma de variáveis de classificação linguística que incluem 'baixo', 'médio' e 'alto', conforme anteriormente abordado. Em virtude dessa classificação, a escala de três pontos foi adotada principalmente pela simplicidade na coleta dos dados, visto que para os especialistas é melhor oferecer suas respostas numa escala menor, evitando vieses, e pela

facilidade de interpretabilidade para os tomadores de decisão (KHAN et al., 2018). Essas variáveis são equivalentes a números fuzzy em uma escala numérica de 0 a 1.

Como mencionado na seção 2.4.5, um sistema de inferência fuzzy hierárquico (HFIS) é produzido decompondo as variáveis de entrada de um FIS clássico em uma hierarquia de vários FISs de baixa dimensionalidade, onde a integração desses níveis inferiores é estabelecida através de camadas. Os três HFIS projetados possuem uma topologia serial, garantindo que a saída de um nível servirá como entrada para o próximo nível. A topologia do HFIS de severidade é composta por duas camadas com um FIS para cada camada, conforme ilustrado na Figura 8.

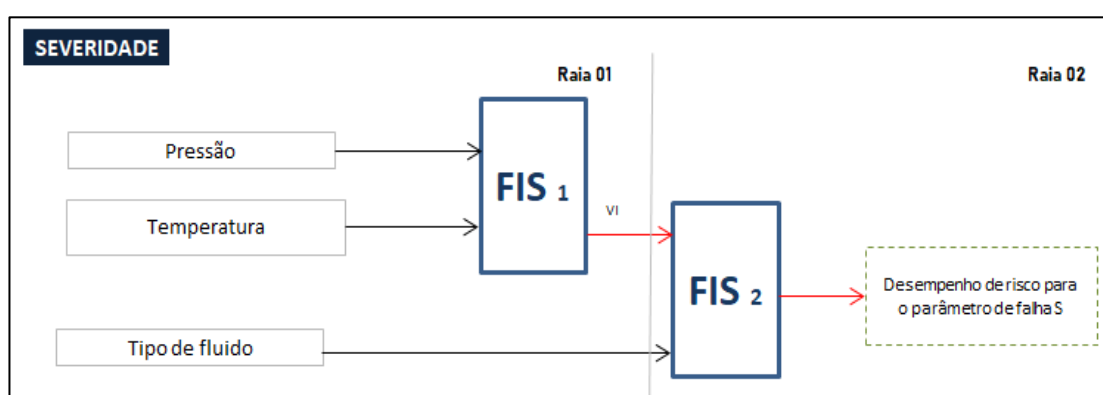


Figura 8 -HFIS do parâmetro Severidade

A combinação de variáveis proposta considerou a premissa de proximidade do universo de pertencimento das variáveis, as variáveis ‘pressão’ e ‘temperatura’ denotam parâmetros de operação e por isso foram utilizadas em um único FIS e a avaliação deste, juntamente com a variável ‘tipo de fluido’ foram utilizadas no segundo FIS.

A topologia do HFIS de ocorrência é composta por três camadas com um FIS para cada camada, conforme ilustrado na Figura 9.

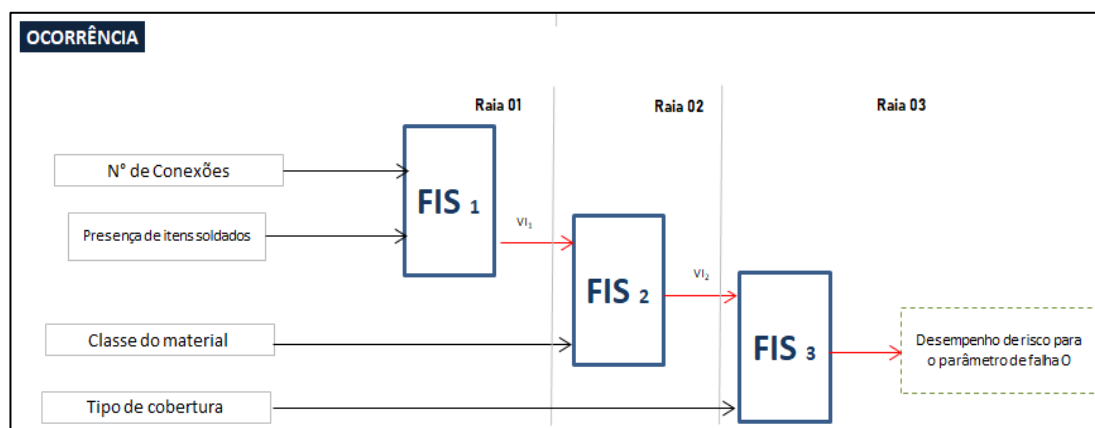


Figura 9 - HFIS do parâmetro Ocorrência

A combinação de variáveis proposta também considerou a premissa de proximidade do universo de pertencimento das variáveis, as variáveis ‘número de conexões’ e ‘presença de itens soldados’ foram consideradas FIS 1, pois ambas associam-se ao risco do fenômeno corrosivo de corrosão por frestas. As demais variáveis foram designadas para os outros dois FIS, sem agrupamento, seguindo a premissa de manter no máximo duas variáveis por FIS de baixo nível (RAZAK et al., 2023).

Por fim, a topologia do HFIS de detecção é composta por duas camadas com um FIS para cada camada, conforme ilustrado na Figura 10.

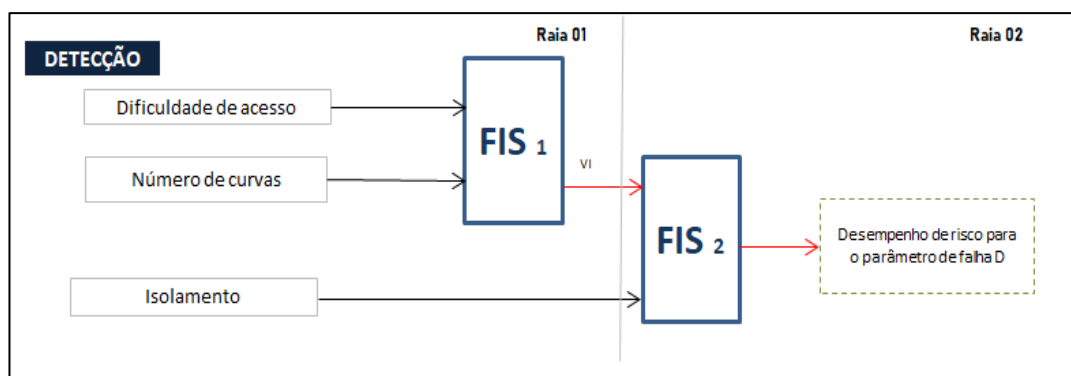


Figura 10 - HFIS do parâmetro Detecção

A combinação de variáveis proposta considerou a premissa de proximidade do universo de pertencimento das variáveis, as variáveis ‘dificuldade de acesso’ e ‘número de curvas’ são abordadas no FIS 1, pois ambas associam-se aos desafios de realizar uma inspeção assertiva. A avaliação resultante desse FIS juntamente com a variável ‘isolamento’ foram utilizadas no segundo FIS.

A implementação desses sistemas foi realizada em Python, utilizando o pacote *scikit-fuzzy*, que incorpora muitas ferramentas para projetos que envolvem lógica fuzzy (WARNER, 2019). Após a configuração da topologia e estabelecer os binômios entrada(s) e saída, foram definidos os conjuntos de regras para comporem o motor de inferência dos respectivos HFISs. Para o HFIS do parâmetro ‘severidade’ foram formuladas 15 regras, das quais 9 regras foram resultantes do FIS₁ $((2-1)*3^2= 9)$ e as 6 regras remanescentes resultaram do FIS₂ $(3*2, 3$ regras provenientes da primeira variável e 2 regras referentes a segunda variável), essas regras diferem da lei de formação geral, pois são compostas por diferentes conjuntos fuzzy, respectivamente 3 (alto, medio e baixo) e 2 (alto e baixo). Por fim, para o HFIS do parâmetro ‘ocorrência’ foram formuladas 21 regras, das quais 6 regras foram resultantes do FIS₁ $(3*2, 3$ regras provenientes da primeira variável e 2 regras referentes a segunda variável), 9 regras foram resultantes do FIS₂ $((2-1)*3^2= 9)$ e as 6

remanescentes resultaram do FIS₃ (3*2, 3 regras provenientes da primeira variável e 2 regras referentes a segunda variável).

Para estruturação das regras, as seguintes premissas foram consideradas, (i) as combinações de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes ao conjunto fuzzy 'baixo' e de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes, respectivamente ao conjunto fuzzy 'baixo' e 'medio' geram uma variável de saída também classificada como 'baixo'; (ii) as combinações de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes ao conjunto fuzzy 'medio' e de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes, respectivamente ao conjunto fuzzy 'alto' e 'baixo' geram uma variável de saída também classificada como 'medio'; e (iii) as combinações de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes ao conjunto fuzzy 'alto' e de variáveis de entrada (fatores de risco) pertencentes, respectivamente ao conjunto fuzzy 'alto' e 'medio' geram uma variável de saída também classificada como 'alto'. Portanto, todos os antecedentes das regras foram combinados através do operador booleano &, para garantir a existência da classificação de as ambas variáveis de entrada. A Figura 11 ilustra o bloco de regras do FIS1 pertencente ao ambiente HFIS1, do parâmetro de falha 'severidade'. Os demais blocos de regras seguem padrão semelhante.

```
#REGRAS
R1 = control.Rule(Temperatura['alto'] & Pressao['baixo'], Risco1_S['medio'])
R2 = control.Rule(Temperatura['alto'] & Pressao['medio'], Risco1_S['alto'])
R3 = control.Rule(Temperatura['alto'] & Pressao['alto'], Risco1_S['alto'])

R4 = control.Rule(Temperatura['medio'] & Pressao['baixo'], Risco1_S['baixo'])
R5 = control.Rule(Temperatura['medio'] & Pressao['medio'], Risco1_S['medio'])
R6 = control.Rule(Temperatura['medio'] & Pressao['alto'], Risco1_S['alto'])

R7 = control.Rule(Temperatura['baixo'] & Pressao['baixo'], Risco1_S['baixo'])
R8 = control.Rule(Temperatura['baixo'] & Pressao['medio'], Risco1_S['baixo'])
R9 = control.Rule(Temperatura['baixo'] & Pressao['alto'], Risco1_S['medio'])
```

Figura 11 - Exemplificação do bloco de regras

A classificação de cada um dos antecedentes das regras (variáveis de entrada/ fatores/critérios de avaliação de ativos) foi desenhada com base dos paradigmas localizados na literatura e documentação técnica e captados por especialistas e estão catalogados no **Erro! Fonte de referência não encontrada..**

4.2.1. Resultados dos HFIS dos parâmetros S,O e D

Cada subconjunto dos ativos TVFs escolhidos para análise passou por avaliação utilizando o motor de inferência presente nos ambientes HFIS projetados. Dado que um ativo TVF é composto por diversos subconjuntos (conforme mostrado na Tabela 2), optamos por realizar uma avaliação combinada do desempenho de todos os subconjuntos. Esse método permitiu a definição da criticidade do ativo, utilizando uma análise que combina a frequência absoluta com regras *if-else* de classificação. Após a execução do HFIS para cada parâmetro de risco, os resultados foram avaliados por meio das seguintes etapas: (i) cálculo da frequência absoluta dos subconjuntos classificados como alto, médio e baixo; (ii) cálculo da frequência absoluta combinada (alto-médio, alto-baixo e médio-baixo); (iii) avaliação dos resultados. A classificação do conjunto é determinada pela maior frequência absoluta entre ‘alto-médio’, ‘alto-baixo’ e ‘médio-baixo’ dos subconjuntos que o compõe. Em resumo, a classificação final é 'Alto' para a maior frequência absoluta em ‘alto-médio’, 'Médio' para a maior frequência absoluta em ‘alto-baixo’ e 'Baixo' para a maior frequência absoluta em ‘médio-baixo’. Uma avaliação remanescente é aplicada quando todos os subconjuntos pertencentes a um ativo TVF possuem a mesma classificação (alto, médio ou baixo), qual seja: a classe predominante é a classificação final de todo o conjunto TVF analisado. Reitera-se que o desempenho obtido nessa etapa, exemplificado na Tabela 12 relaciona-se com os critérios de avaliação no nível de subsistema, que consiste em uma das etapas de obtenção da classificação total (seção 4.4).

Tabela 12 - Classificações de conjuntos TVF para o parâmetro O

Localização	Frequência absoluta dos subconjuntos	Classificação do ativo TVF
M09_S01	alto-médio: 55 alto-baixo: 177 médio-baixo: 160	Médio
M16_S02	alto-médio: 116 alto-baixo: 132 médio-baixo: 158	Baixo
M23_S03	alto-médio: 40 alto-baixo: 28 médio-baixo: 26	Alto

Com base nesse padrão avaliativo, empreendeu-se a classificação, no nível subsistema, para cada um dos ativos TVFs selecionados (Tabela 2, seção 4). Essa classificação foi obtida para cada um dos parâmetros de falha S, O e D. A Tabela 13 categoriza os resultados

obtidos na avaliação do parâmetro ocorrência, o mesmo racional foi aplicado para os outros parâmetros (severidade e detecção).

Tabela 13 - Classificação dos ativos TVFs para o parâmetro O

Módulo	Sector	Classificação com base nos subconjuntos TVFs
M09	S01-TVF	Médio
	S02-TVF	Baixo
	S03-TVF	Baixo
	S04-TVF	Baixo
	S05-TVF	Baixo
M16	S01-TVF	Baixo
	S02-TVF	Baixo
	S03-TVF	Médio
	S04-TVF	Baixo
	S05-TVF	Baixo
M23	S01-TVF	Alto
	S02-TVF	Alto
	S03-TVF	Alto
	S04-TVF	Alto
	S05-TVF	Alto
	S01-TVF	Médio
	S02-TVF	Baixo
	S03-TVF	Médio
M24	S04-TVF	Baixo
	S05-TVF	Baixo
	S06-TVF	Médio
	S07-TVF	Médio
	S08-TVF	Médio
	S09-TVF	Médio
	S10-TVF	Médio

O aspecto central que explica a classificação de cada um dos sistemas é o motor de inferência mandani (seção 4.2). As classificações foram obtidas através da análise do conteúdo dos critérios associados a cada subconjunto, conforme detalhado no **Erro! Fonte de referência não encontrada..** Conforme a avaliação da classificação do ativo TVF do módulo 24 localizado no setor 01.

- S01-TVF- predominância de conjuntos com classificações ‘alta’ (e.g. para todos os subconjuntos há previsão de solda em campo – classificação de risco ‘alto’ e para nenhum

deles há cobertura de proteção associada) e ‘baixa’ (e.g. todos os subconjuntos possuem cobertura – classificação de risco ‘baixo’ e possuem números de conexões localizados na faixa de risco de classificação ‘baixo’).

Essa é tônica do processo de classificação de todos os ativos, na abordagem subsistema. No entanto, essa classificação é parcial, pois há outros fatores que impactam a classificação dos ativos na abrangência de sistema, conforme estudo produzido por (CAIADO et al., 2021). Essa conjuntura será abordada equalizando critérios de seleção nos níveis de subsistemas (avaliação dos subconjuntos) e nos níveis de sistemas (ativo TVF completo – composto por subconjuntos), explicada na seção a seguir. Optou-se por integrar as naturezas dos critérios (sistemas e subsistemas), a fim de garantir uma avaliação holística, não somente considerando fatores que se referem aos pormenores do sistema (análise dos subsistemas), mas fatores que abordam fatores de risco mais generalistas (riscos de explosão, equipamentos no entorno, incidência de vento, temperatura da superfície e condições de iluminação), viabilizando uma análise mais robusta, portanto.

4.3. Definição dos pesos dos critérios

Relembra-se que a problemática motivadora dessa pesquisa é determinar os ativos mais críticos para compor um mix ótimo para empreender atividades de manutenção relacionadas à mitigação da corrosão externa. Nesse contexto, os ativos são avaliados conforme os critérios de análise obtidos por abordagens estruturadas. Esses critérios dentro da dinâmica operativa não possuem níveis de importância iguais, ou seja, uns critérios são mais significativos que outros, refletindo assim a natureza complexa dos problemas do mundo real de tomada de decisões. O método BWM, conforme supracitado, é um modelo multicritério hábil para definir os coeficientes de pesos dos critérios. Para convergir às abordagens de análise dos ativos no nível de sistema (TVF) (CAIADO et al., 2021) e subsistema (subconjuntos de tubulações), que é a proposta da presente pesquisa, os critérios referentes às análises dos subconjuntos de tubulações (seção 4.1.3) foram agrupados para então receber um peso único, para cada um dos parâmetros de falha S, O e D. Nessa conjuntura, esses parâmetros de falha performaram como um único critério de avaliação, permitindo distingui-lo em relação aos demais parâmetros avaliadores no nível sistema, conforme ilustrado na Figura 12.

FATOR		PARADIGMA DE AVALIAÇÃO
Pressão, Temperatura e Tipo de fluido	Riscos de Explosões (S)	Sistema
	Fator_Sev_Subistemas (S)	Subsistema
	Equipamentos no entorno (S)	Sistema
	Incidência de vento (O)	Sistema
Dificuldade de acesso, Número de curvas e Isolamento térmico	Temperatura da superfície (O)	Sistema
	Fator_Ocor_Subistemas (O)	Subsistema
	Condições de iluminação (D)	Sistema
	Fator_Det_Subistemas (D)	Subsistema

Número de conexões,
Presença de itens soldados,
Classe do material e Tipo
de cobertura

Figura 12 - Fatores multiníveis de avaliação de TVF

Esses fatores, portanto, definem o conjunto de critérios de decisão avaliados pelos especialistas, que consiste no primeiro estágio do método BWM, seleção de critérios. O segundo estágio na formação do BWM é a determinação dos critérios melhores e piores. O melhor critério é aquele identificado por cada respondente como o critério mais significativo para o processo da corrosão externa nos sistemas TVF, enquanto o pior critério é aquele considerado o menos significativo. Essas informações foram obtidas pela mesma entrevista de seleção de critérios (seção 4.1.2).

Para o parâmetro de falha ‘severidade’, as respostas dos especialistas podem ser observadas na Tabela 14.

Tabela 14- Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha S

SEVERIDADE		
ESPECIALISTA	MELHOR CRITÉRIO	PIOR CRITÉRIO
1	Fator_Sev_Subistemas	Equipamentos no entorno
2	Fator_Sev_Subistemas	Equipamentos no entorno
3	Riscos de explosões	Equipamentos no entorno
4	Riscos de explosões	Fator_Sev_Subistemas
5	Riscos de explosões	Equipamentos no entorno
6	Fator_Sev_Subistemas	Equipamentos no entorno
7	Fator_Sev_Subistemas	Equipamentos no entorno
8	Riscos de explosões	Equipamentos no entorno

Observa-se que 50% dos especialistas definiram o fator riscos de explosões como o critério mais significativo dentre os demais, em virtude das consequências que esse tipo de evento pode representar para as dimensões social, ambiental e financeiro, com forte impacto negativo para a imagem da organização. Os demais especialistas (50%) julgaram que o fator integrado, referentes à avaliação dos subsistemas, é o mais significativo, pois

além dos impactos que os mesmos podem representar, como acidentes de trabalho, impacto ambiental (devido a vazamento de fluidos), estes ainda consistem em fatores que podem influenciar no fator risco de explosões. Para a definição do pior fator, foi quase que unânime (87,5%) a indicação do fator ‘equipamentos no entorno’, que denota a quantidade de equipamentos que podem ser afetados pela falha do ativo analisado, sob a justificativa de que há mecanismos de proteção na plataforma, como redundâncias, para os ativos mais críticos.

Para o parâmetro de falha ‘ocorrência’, as respostas dos especialistas podem ser observadas na Tabela 15.

Tabela 15 - Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha O

OCORRÊNCIA		
ESPECIALISTA	MELHOR CRITÉRIO	PIOR CRITÉRIO
1	Fator_Ocor_Subistemas	Temperatura da superfície
2	Fator_Ocor_Subistemas	Temperatura da superfície
3	Fator_Ocor_Subistemas	Incidência de vento
4	Fator_Ocor_Subistemas	Temperatura da superfície
5	Fator_Ocor_Subistemas	Temperatura da superfície*
6	Fator_Ocor_Subistemas	Incidência de vento*
7	Fator_Ocor_Subistemas	Incidência de vento*
8	Fator_Ocor_Subistemas	Temperatura da superfície

Todos os especialistas entrevistados (100%) indicaram o fator integrado para o parâmetro ocorrência (Fator_Ocor_Subistemas) como o critério mais significativo dentre os demais, pois o mesmo se relaciona com aspectos críticos inerentes dos conjuntos de tubulações (Número de conexões, Presença de itens soldados, Classe do material e Tipo de cobertura), designando vulnerabilidade, em virtude da maior propensão de observação do fenômeno de corrosão por frestas e da interação com o ambiente marinho. Para a definição do pior fator, 50% dos especialistas indicaram o critério ‘Temperatura de superfície’, 12,50% indicaram o critério incidência de vento e 37,50% definiram que os critérios ‘temperatura de superfície’ e ‘incidência de vento’ eram igualmente piores. Para esses casos, conforme preconiza o autor do método (REZAEI, 2015), se mais de um critério for considerado o melhor ou o pior, um deles poderá ser escolhido arbitrariamente. Essas escolhas estão sinalizadas através de um asterisco.

Para o parâmetro de falha ‘detecção’, as respostas dos especialistas podem ser observadas na Tabela 16.

Tabela 16 - Definição do melhor e do pior critério para o parâmetro de falha D

DETECÇÃO		
ESPECIALISTA	MELHOR CRITÉRIO	PIOR CRITÉRIO
1	Condições de iluminação	Fator_Det_Subistemas
2	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação
3	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação
4	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação
5	Condições de iluminação	Fator_Det_Subistemas
6	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação
7	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação
8	Fator_Det_Subistemas	Condições de iluminação

Para esse parâmetro de falha, 75% definiram que o critério mais representativo é o fator integrado (Fator_Det_Subistemas), enquanto para os demais (25%), o critério mais representativo seria o ‘condições de iluminação’. Para os especialistas que indicaram o fator integrado, a maior justificativa se debruçou sobre a questão de que se trata de um fator que é composto por critérios que, na prática configuram-se como desafios para a realização de rotinas de manutenção que visem a inspeção ou mitigação da corrosão, muito puxado pelo fator isolamento térmico que demanda a realização de atividades técnicas muito específicas (e.g. retirada do isolamento). A definição do pior critério depreende-se a partir de uma análise suplementar, visto que o parâmetro de falha analisado é composto por apenas dois fatores.

O terceiro estágio consistiu na identificação das preferências dos especialistas ao comparar o melhor critério com os demais, atribuindo uma pontuação que varia entre 1 e 9, onde 1 implica uma importância igual em relação ao outro critério e 9 implica que o critério mais importante é extremamente mais preferido em relação ao outro critério. Esse estágio resulta em um vetor denominado *Melhor-para-Outros (BO)* para cada especialista e para cada parâmetro de falha (S,O e D), conforme Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19, onde fator_1 é riscos de explosões, fator_2 é o fator integrado de subsistemas (S) e o fator_3 é o equipamentos no entorno, fator_4 é incidência de vento, fator_5 é temperatura de superfície, fator_6 é o fator integrado de subsistemas (O), fator_7 é condições de iluminação e o fator_8 é o fator integrado de subsistemas (D).

Tabela 17 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Severidade

Melhor-para-Outros (BO) para os 8 entrevistados Severidade				
Entrevistado	Melhor Critério/ Demais critérios	Fator_1	Fator_2	Fator_3
1	Fator_Sev_Subistemas	3	1	4
2	Fator_Sev_Subistemas	2	1	4
3	Riscos de Explosões	1	2	4
4	Riscos de Explosões	1	3	2
5	Riscos de Explosões	1	2	5
6	Fator_Sev_Subistemas	2	1	7
7	Fator_Sev_Subistemas	2	1	5
8	Riscos de Explosões	1	2	7

Tabela 18 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Ocorrência

Melhor-para-Outros (BO) para os 8 entrevistados Ocorrência				
Entrevistado	Melhor Critério/ Demais critérios	Fator_4	Fator_5	Fator_6
1	Fator_Ocor_Subistemas	6	7	1
2	Fator_Ocor_Subistemas	7	8	1
3	Fator_Ocor_Subistemas	5	3	1
4	Fator_Ocor_Subistemas	6	7	1
5	Fator_Ocor_Subistemas	6	7	1
6	Fator_Ocor_Subistemas	7	6	1
7	Fator_Ocor_Subistemas	8	5	1
8	Fator_Ocor_Subistemas	5	7	1

Tabela 19 - Vetores Melhor-para-outros (BO) para o parâmetro Detecção

Melhor-para-Outros (BO) para os 8 entrevistados Detecção			
Entrevistado	Demais critérios/ Melhor critério	Fator_7	Fator_8
1	Condições de iluminação	1	3
2	Fator_Det_Subistemas	2	1
3	Fator_Det_Subistemas	5	1
4	Fator_Det_Subistemas	2	1
5	Condições de iluminação	1	5
6	Fator_Det_Subistemas	2	1
7	Fator_Det_Subistemas	5	1
8	Fator_Det_Subistemas	2	1

Analogamente, após a conclusão desse estágio, é necessário determinar a preferência de todos os critérios sobre o pior critério, quarto estágio. Nesse estágio, aos especialistas é solicitado indicar suas preferências de todos os critérios sobre o critério menos importante. Novamente, um valor entre 1 e 9 é utilizado. Isso resulta nos vetores *Outros-para-Pior*

(OW), para cada especialista e para cada parâmetro de falha (S, O e D), conforme Tabela 20,

Tabela 21 e Tabela 22.

Tabela 20 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Severidade

Outros-para-Pior (OW), para os 8 entrevistados Severidade								
Entrevistado	1	2	3	4	5	6	7	8
Demais critérios/ Pior critério	Fator_3	Fator_3	Fator_3	Fator_2	Fator_3	Fator_3	Fator_3	Fator_3
Riscos de Explosões	2	2	4	3	5	5	3	7
Fator_Sev_Subistemas	5	4	2	1	3	7	5	5
Equipamentos no entorno	1	1	1	2	1	1	1	1

Tabela 21 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Ocorrência

Outros-para-Pior (OW), para os 8 entrevistados Ocorrência								
Entrevistado	1	2	3	4	5	6	7	8
Demais critérios/ Pior critério	Fator_5	Fator_5	Fator_4	Fator_5	Fator_5	Fator_4	Fator_4	Fator_5
Incidência de vento	2	2	1	2	2	1	1	2
Temperatura da superfície	1	1	3	1	1	2	2	1
Fator_Ocor_Subistemas	8	8	5	7	7	7	8	5

Tabela 22 - Vetores Outros-para-Pior (OW) para o parâmetro Detecção

Outros-para-Pior (OW), para os 8 entrevistados Detecção								
Entrevistado	1	2	3	4	5	6	7	8
Demais critérios/ Pior critério	Fator_8	Fator_7	Fator_7	Fator_7	Fator_8	Fator_7	Fator_7	Fator_7
Condições de iluminação	3	1	1	1	5	1	1	1
Fator_Det_Subistemas	1	2	5	2	1	2	5	2

Após a realização desses estágios, prossegue-se para o quinto estágio, que consiste em calcular os pesos ótimos para os oito entrevistados, através do modelo linear descrito na seção 2.5, comparando as alternativas (Melhor-Demais alternativas; Demais alternativas-Pior). Para empreender esse estágio, a biblioteca pyDecision (PEREIRA, 2023) , composto por inúmeras ferramentas para solucionar modelos multicritérios, da linguagem Python foi utilizada. Após a obtenção dos pesos para cada um dos respondentes, foi calculada a média aritmética dos pesos dos critérios, calculada a partir das oito respostas, de modo a gerar um peso único para cada critério (REZAEI, 2015; REZAEI et al., 2016), conforme Tabela 23.

Tabela 23 - Pesos globais dos critérios de decisão

PESOS DOS CRITÉRIOS (CONSOLIDADO) BEST-WORST METHOD										
Fator	(S,O,D)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	Peso BWM
Fator_1	S	0,2325	0,2857	0,5714	0,5417	0,5833	0,3269	0,3056	0,5962	0,4304
Fator_2	S	0,6280	0,5714	0,2857	0,1667	0,3056	0,5962	0,5833	0,3269	0,4330
Fator_3	S	0,1396	0,1429	0,1429	0,2917	0,1111	0,0769	0,1111	0,0769	0,1366
Fator_4	O	0,1375	0,1212	0,1111	0,1375	0,1375	0,1000	0,0909	0,1642	0,1250
Fator_5	O	0,1000	0,0909	0,2444	0,1000	0,1000	0,1375	0,1558	0,1194	0,1310
Fator_6	O	0,7625	0,7879	0,6444	0,7625	0,7625	0,7625	0,7532	0,7164	0,7440
Fator_7	D	0,7500	0,3333	0,1667	0,3333	0,1667	0,3333	0,1667	0,3333	0,3229
Fator_8	D	0,2500	0,6667	0,8333	0,6667	0,8333	0,6667	0,8333	0,6667	0,6771

Antes de empreender a agregação dos pesos dos critérios, foi verificada a consistência dos resultados, a fim de garantir a robustez da análise. Para cada respondente, foi calculado o indicador de consistência, a fim de avaliar a consistência interna dessas comparações feitas por cada especialista. Em virtude disso, a agregação foi feita a partir de pesos com índices de consistência aceitáveis. Índices de consistência próximos de zero denotam alta consistência nos resultados (REZAEI et al., 2016) e, portanto, confiabilidade nas comparações. A Tabela 24 apresenta os índices de consistência dos 8 entrevistados.

Tabela 24 – Resumo das razões de consistências

Razões de consistência								
(S,O,D)	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
S	0,0428	0	0	0,0417	0,0121	0,0155	0,0121	0,0155
O	0,0168	0,0136	0,0387	0,0168	0,0168	0,0168	0,0058	0,032
D	0	0	0	0	0	0	0	0

Todos os índices estão próximos de zero e, portanto, confiáveis. Esse resultado pode ser explicado tanto pela experiência dos especialistas, avaliando os critérios de maneira assertiva, quanto pela orientação dada na entrevista na construção dos vetores ‘Melhor-para-outros’ e ‘Outros-para-Pior’. Destaca-se ainda que para o parâmetro de falha ‘Detecção’ os índices apresentados foram todos zero, pois a comparação ocorreu entre dois critérios apenas, resultando em avaliações completamente consistentes.

A etapa de cálculos dos pesos foi concluída a partir da conclusão dos cinco estágios do BWM e da verificação de consistência das avaliações. Como pode ser observado nos resultados, o fator agregado para a análise dos subconjuntos para o parâmetro severidade é levemente mais importante do que o fator risco de explosões, ambos figurando como os

mais relevantes para corrosão externa e significativamente superiores ao fator ‘equipamentos no entorno’. Já analisando os pesos dos critérios incluídos no parâmetro de falha ocorrência e detecção, os fatores agregados são significativamente superiores aos demais indicando a importância de avaliação dos subconjuntos que compõem os TVFs principalmente nessas duas dimensões, o que corrobora a importância da realização de uma pesquisa multinível.

Após os cálculos dos pesos, é possível delinear uma matriz que associa o desempenho dos ativos selecionados com base nos critérios de avaliação levantados por especialistas, através da ferramenta HFIS e a associação dos pesos para cada um desses critérios, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - Matriz Desempenho x Peso dos critérios de avaliação (S)

Peso (Best-Worst Method)	0,4304	0,1366	0,4330
Sistema/Fator	Riscos de Explosões	Equipamentos no entorno	Fator Composto Subsistemas
P-75_M09_S01-TVF	Medio	Alto	Baixo
P-75_M09_S02-TVF	Medio	Alto	Baixo
P-75_M09_S03-TVF	Medio	Alto	Alto
P-75_M09_S04-TVF	Medio	Alto	Baixo
P-75_M09_S05-TVF	Medio	Alto	Baixo
P-75_M16_S01-TVF	Baixo	Medio	Medio
P-75_M16_S02-TVF	Baixo	Medio	Baixo
P-75_M16_S03-TVF	Baixo	Medio	Baixo
P-75_M16_S04-TVF	Baixo	Medio	Baixo
P-75_M16_S05-TVF	Baixo	Medio	Baixo
P-75_M23_S01-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M23_S02-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M23_S03-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M23_S04-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M23_S05-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S01-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S02-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S03-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S04-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S05-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S06-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S07-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S08-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S09-TVF	Alto	Alto	Baixo
P-75_M24_S010-TVF	Alto	Alto	Baixo

Após os cálculos dos pesos, é possível delinear uma matriz que associa o desempenho dos ativos selecionados com base nos critérios de avaliação levantados por especialistas,

através da ferramenta HFIS e a associação dos pesos, calculados através do modelo multicritério BWM, para cada um desses critérios, conforme Tabela 25. É possível depreender, portanto, que a composição de fatores dos níveis de sistema e subsistema muda a dinâmica avaliativa significativamente, em detrimento de uma avaliação única, tanto para o nível de sistema (variedade de classificações, mas com predominância de classificação de risco ‘alto’ para o módulo 23), quanto para o nível de subsistema (predominância de classificações de risco ‘baixo’). Para obter uma classificação agregada nos níveis de sistema e subsistema, é necessário convergir à análise de seus respectivos critérios de avaliação, ponderando-os com os pesos atribuídos.

4.4. Determinação do desempenho dos ativos para os parâmetros

A fim de atingir esse objetivo, o método multicritério fuzzy VIKOR foi adotado, método que dispõe de soluções de compromisso, soluções viáveis mais próximas do ideal (distância das alternativas em relação à solução ideal) (OPRICOVIC, 2011), onde tanto os critérios quanto os pesos podem ser conjuntos fuzzy. O objetivo, reafirma-se, é de agregar o desempenho dos ativos em relação às performances dos critérios de avaliação tanto nível de sistema (CAIADO et al., 2021), quanto no nível subsistema, endereçado pelo framework prático apresentado na presente pesquisa, para os parâmetros S, O e D. Para empreender esse estágio, a biblioteca pyDecision (PEREIRA, 2023) foi novamente utilizada, em virtude da disponibilidade de ferramentas solucionar modelos multicritérios. O primeiro passo é empreender a seleção de alternativas. Para o problema em questão, as alternativas são os ativos TVFs analisados (conforme Tabela 13). No entanto, avaliando as alternativas, ficou identificado que algumas delas possuíam exatamente as mesmas classificações em relação aos mesmos critérios avaliativos, não permitindo o modelo, que é baseado em distâncias, fazer distinção entre elas. A fim de mitigar essa questão, para essa etapa, esses ativos foram agrupados, em virtude de suas similaridades, conforme Tabela 26, Tabela 27 e Tabela 28.

Tabela 26 - Alternativas do parâmetro Severidade

SEVERIDADE		
Alternativa	Rótulo das alternativas	Sistemas de interesse
a1	TVF_Medio_Alto_Baixo	P-75_M09_S01-TVF; P-75_M09_S02-TVF; P-75_M09_S04-TVF; P-75_M09_S05-TVF
a2	TVF_Medio_Alto_Alto	P-75_M09_S03-TVF
a3	TVF_Baixo_Medio_Medio	P-75_M16_S01-TVF
a4	TVF_Baixo_Medio_Baixo	P-75_M16_S02-TVF; P-75_M16_S03-TVF; P-75_M16_S04-TVF; P-75_M16_S05-TVF

a5	TVF_Alto_Alto_Baixo	P-75_M23_S01-TVF; P-75_M23_S02-TVF; P-75_M23_S03-TVF; P-75_M23_S04-TVF; P-75_M23_S05-TVF; P-75_M24_S01-TVF; P-75_M24_S02-TVF; P-75_M24_S03-TVF; P-75_M24_S04-TVF; P-75_M24_S05-TVF; P-75_M24_S06-TVF; P-75_M24_S07-TVF; P-75_M24_S08-TVF; P-75_M24_S09-TVF; P-75_M24_S10-TVF
----	---------------------	--

Tabela 27 - Alternativas do parâmetro Ocorrência

OCORRÊNCIA		
Alternativa	Rótulo das alternativas	Sistemas de interesse
a1	TVF_Baixo_Alto_Medio	P-75_M09_S01-TVF; P-75_M24_S01-TVF; P-75_M24_S03-TVF; P-75_M24_S06-TVF; P-75_M24_S07-TVF; P-75_M24_S08-TVF; P-75_M24_S09-TVF; P-75_M24_S10-TVF
a2	TVF_Baixo_Alto_Baixo	P-75_M09_S02-TVF ; P-75_M09_S03-TVF; P-75_M09_S04-TVF; P-75_M24_S02-TVF; P-75_M24_S04-TVF; P-75_M24_S05-TVF
a3	TVF_Alto_Alto_Baixo	P-75_M09_S05-TVF
a4	TVF_Baixo_Baixo_Baixo	P-75_M16_S01-TVF; P-75_M16_S02-TVF
a5	TVF_Baixo_Baixo_Medio	P-75_M16_S03-TVF
a6	TVF_Alto_Baixo_Baixo	P-75_M16_S02-TVF; P-75_M16_S05-TVF
a7	TVF_Alto_Baixo_Alto	P-75_M23_S01-TVF; P-75_M23_S02-TVF; P-75_M23_S03-TVF; P-75_M23_S04-TVF; P-75_M23_S05-TVF

Tabela 28 - Alternativas do parâmetro Detecção

DETECÇÃO		
Alternativa	Rótulo das alternativas	Sistemas de interesse
a1	TVF_Baixo_Alto	P-75_M09_S01-TVF; P-75_M09_S02-TVF; P-75_M09_S03-TVF; P-75_M09_S04-TVF; P-75_M16_S01-TVF; P-75_M16_S02-TVF; P-75_M24_S01-TVF; P-75_M24_S03-TVF; P-75_M24_S04-TVF; P-75_M24_S05-TVF; P-75_M24_S07-TVF; P-75_M24_S08-TVF; P-75_M24_S09-TVF; P-75_M24_S10-TVF
a2	TVF_Alto_Baixo	P-75_M09_S05-TVF
a3	TVF_Baixo_Medio	P-75_M16_S03-TVF
a4	TVF_Alto_Medio	P-75_M16_S04-TVF; P-75_M16_S05-TVF
a5	TVF_Alto_Alto	P-75_M23_S01-TVF; P-75_M23_S02-TVF; P-75_M23_S03-TVF; P-75_M23_S04-TVF; P-75_M23_S05-TVF
a6	TVF_Baixo_Baixo	P-75_M24_S02-TVF; P-75_M24_S06-TVF

Após definir as alternativas, o método fuzzy VIKOR determina que seja construída uma matriz de performance (Tabela 29, Tabela 30 e Tabela 31), que contenha os critérios de avaliação, os pesos dos critérios, a direção de otimização e os valores das funções de

critério. A definição dos critérios de avaliação foi realizada para cada um dos parâmetros de falha, considerando os critérios da dimensão sistema e subsistema, a exemplo do que fora empreendido na seção 4.3, para o cálculo dos pesos. Em seguida, definiram-se os pesos dos critérios (calculados pelo método BWM, seção 4.3) e a direção de otimização (max. ou min.). Para todos os critérios, a direção definida foi a de maximização, pois se objetivou selecionar a alternativa com o maior risco associado. Foi necessário também definir os valores das funções de critério, que segundo Opricovic (2011), devem ser obtidos através de um estudo abrangente do sistema avaliado, portanto, para a presente pesquisa, este estudo consistiu na análise de cada um dos sistemas por meio dos sistemas de inferência (seção 4.2).

Tabela 29 - Matriz de performance para o parâmetro Severidade

Matriz de performance Severidade							
Critério		Alternativas					
Nome	Direção de otimização		a1	a2	a3	a4	a5
Riscos de Explosões	Max	<i>l</i>	0,25	0,25	0	0	0,5
		<i>m</i>	0,5	0,5	0,25	0,25	0,75
		<i>r</i>	0,75	0,75	0,5	0,5	1
Equipamentos no entorno	Max	<i>l</i>	0,5	0,5	0,25	0,25	0,5
		<i>m</i>	0,75	0,75	0,5	0,5	0,75
		<i>r</i>	1	1	0,75	0,75	1
Fator Composto Subsistemas	Max	<i>l</i>	0	0,5	0,25	0	0
		<i>m</i>	0,25	0,75	0,5	0,25	0,25
		<i>r</i>	0,5	1	0,75	0,5	0,5

Tabela 30 - Matriz de performance para o parâmetro Ocorrência

Matriz de performance Ocorrência									
Critério			Alternativas						
Nome	Direção de otimização		a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
Incidência de vento	Max	l	0	0	0,5	0	0	0,5	0,5
		m	0,25	0,25	0,75	0,25	0,25	0,75	0,75
		r	0,5	0,5	1	0,5	0,5	1	1
Temperatura da superfície	Max	l	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
		m	0,75	0,75	0,75	0,25	0,25	0,25	0,25
		r	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5
Fator Composto Subsistemas	Max	l	0,25	0	0	0	0,25	0	0,5
		m	0,5	0,25	0,25	0,25	0,5	0,25	0,75
		r	0,75	0,5	0,5	0,5	0,75	0,5	1

Tabela 31 - Matriz de performance para o parâmetro Detecção

Matriz de performance Detecção								
Critério			Alternativas					
Nome	Direção de otimização		a1	a2	a3	a4	a5	a6
Condições de iluminação	Max	<i>l</i>	0	0,5	0	0,5	0,5	0
		<i>m</i>	0,25	0,75	0,25	0,75	0,75	0,25
		<i>r</i>	0,5	1	0,5	1	1	0,5
Fator Composto Subistemas	Max	<i>l</i>	0,5	0	0,25	0,25	0,5	0
		<i>m</i>	0,75	0,25	0,5	0,5	0,75	0,25
		<i>r</i>	1	0,5	0,75	0,75	1	0,5

Os resultados obtidos pelo algoritmo Fuzzy VIKOR (seção 2.6) são apresentados na Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34.

Tabela 32 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (S)

Resultados Fuzzy VIKOR (Severidade)					
Parâmetros	Alternativas				
	a1	a2	a3	a4	a5
Posição no Ranking	3°	1°	4°	5°	2°
Medida Q no universo no intervalo de classificação (Alto, Médio, Baixo)	0,2241	1,0000	0,1439	0,0000	0,3612
Classificação	BAIXO	ALTO	BAIXO	BAIXO	MEDIO
S	0,6482	0,2152	0,7835	1,0000	0,4330
R	0,4330	0,2152	0,4304	0,4330	0,4330
Q	0,7759	0,0000	0,8561	1,0000	0,6388

Tabela 33 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (O)

Resultados Fuzzy VIKOR (Ocorrência)							
Parâmetros	Alternativas						
	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7
Posição no Ranking	2°	5°	4°	7°	3°	6°	1°
Medida Q no universo no intervalo de classificação (Alto, Médio, Baixo)	0,5928	0,0754	0,1473	0,0000	0,5175	0,0719	1,0000
Classificação	ALTO	BAIXO	BAIXO	BAIXO	ALTO	BAIXO	ALTO
S	0,4970	0,8690	0,7440	1,0000	0,6280	0,8750	0,1310
R	0,3720	0,7440	0,7440	0,7440	0,3720	0,7440	0,1310
Q	0,4072	0,9246	0,8527	1,0000	0,4825	0,9281	0,0000

Tabela 34 - Resultado do Fuzzy VIKOR para o parâmetro (D)

Resultados Fuzzy VIKOR (Detecção)						
Parâmetros	Alternativas					
	a1	a2	a3	a4	a5	a6

Posição no Ranking	2°	5°	4°	3°	1°	6°
Medida Q no universo no intervalo de classificação (Alto, Médio, Baixo)	0,6001	0,1615	0,4193	0,5807	1,0000	0,0000
Classificação	ALTO	BAIXO	MEDIO	ALTO	ALTO	BAIXO
S	0,3229	0,6771	0,6615	0,3386	0,0000	1,0000
R	0,3229	0,6771	0,3386	0,3386	0,0000	0,6771
Q	0,3999	0,8386	0,5807	0,4193	0,0000	1,0000

Os parâmetros S, R e Q são centrais dentro da metodologia multicritério VIKOR, pois denotam, respectivamente, similaridade (S), medida de arrependimento (R) e a distância (Q), a partir dos cálculos detalhados na seção 2.6. A similaridade avalia a semelhança fuzzy entre as alternativas, a medida de arrependimento mede o quão distante uma alternativa está da ideal, ou seja, o menor arrependimento indica uma menor distância e, por fim, a distância (Q) é um calculada com base nas distâncias de todas as alternativas e a solução ideal, com vistas a otimizar a solução, garantindo que seja a solução ótima encontrada. Diante disso, o conjunto de solução de compromisso é composto pelos critérios com os menores valores de Q, definindo assim as avaliações de precedência para composição do ranking.

Após a obtenção dos rankings de cada um dos parâmetros de falha (S, O e D), através da observância da medida Q, onde o menor valor desse parâmetro ocupa o maior lugar no ranking, ou seja, é a alternativa que maximiza os critérios relacionados à corrosão externa, foram obtidas as classificações conforme as classes ‘alto, médio’ e ‘baixo’, conforme Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34. Para isso, para cada uma das alternativas, uma nova medida Q foi calculada através da técnica de normalização min-max, técnica largamente utilizada para processamento de dados, que mantém a relação entre os dados originais, ajustando-os num limite pré-definido [0,1] (PATRO; SAHU, 2015). Essa etapa foi incluída, a fim de garantir que a maior posição no ranking teria o maior valor de Q associado, de modo a receber a classificação de criticidade alta, e, por conseguinte, o menor valor de Q, a menor classificação de criticidade. Essa classificação seguiu os intervalos dos números fuzzy, cuja teoria foi exposta na seção 2.4.

Superada essa etapa, foram obtidas as classificações de risco dos sistemas TVFs analisados, conforme a metodologia FMEA, para cada um dos parâmetros de falha, conforme Tabela 35.

Tabela 35 - Desempenho geral dos ativos estratificado pelos parâmetros S, O e D.

Sistema/Fator	Severidade	Ocorrência	Detecção
P-75_M09_S01-TVF	0,2241	0,5928	0,6001
P-75_M09_S02-TVF	0,2241	0,0754	0,6001

P-75_M09_S03-TVF	0,9999	0,0000	0,6001
P-75_M09_S04-TVF	0,2241	0,0000	0,6001
P-75_M09_S05-TVF	0,2241	0,1473	0,1615
P-75_M16_S01-TVF	0,1439	0,0001	0,6001
P-75_M16_S02-TVF	0,0001	0,0001	0,6001
P-75_M16_S03-TVF	0,0001	0,5175	0,4193
P-75_M16_S04-TVF	0,0001	0,0719	0,5807
P-75_M16_S05-TVF	0,0001	0,0000	0,5807
P-75_M23_S01-TVF	0,3612	0,9999	0,9999
P-75_M23_S02-TVF	0,3612	0,9999	0,9999
P-75_M23_S03-TVF	0,3612	0,9999	0,9999
P-75_M23_S04-TVF	0,3612	0,9999	0,9999
P-75_M23_S05-TVF	0,3612	0,9999	0,9999
P-75_M24_S01-TVF	0,3612	0,5928	0,6001
P-75_M24_S02-TVF	0,3612	0,0754	0,0001
P-75_M24_S03-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S04-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S05-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S06-TVF	0,3612	0,0000	0,0001
P-75_M24_S07-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S08-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S09-TVF	0,3612	0,0000	0,6001
P-75_M24_S010-TVF	0,3612	0,0000	0,6001

Cada um dos sistemas foi classificado com base nos novos valores Q, calculados de modo a serem representativos para as classificações ‘alto’, ‘médio’ e ‘baixo’. Valores entre 0 e 0,25 receberam classificação ‘baixo’, valores entre 0,26 e 0,50 receberam classificação ‘médio’ e valores entre 0,51 e 1 receberam classificação ‘alto’, garantindo assim que estariam num espaço de solução bem definido e com correlação direta aos conjuntos fuzzy definidos nas etapas anteriores. Embora seja possível que o decisor faça algum juízo de valor para selecionar os ativos avaliando o desempenho dos sistemas em cada um dos parâmetros de falha, a ferramenta FMEA, preconiza que a medida de risco do sistema é obtida a partir da agregação dos desempenhos de cada um dos parâmetros S, O e D.

4.5. Classificação final

A penúltima etapa do framework prático consiste na obtenção da classificação final dos ativos TVFs, através da comparação entre os números de prioridade de risco (RPN) calculados através da agregação das performances obtidas nos parâmetros S, O e D. Para a presente pesquisa, conforme preludiado na motivação, a abordagem HFIS foi utilizada, agregando, portanto, as pontuações por meio da projeção de um novo ambiente de análise FIS, conforme Figura 13.

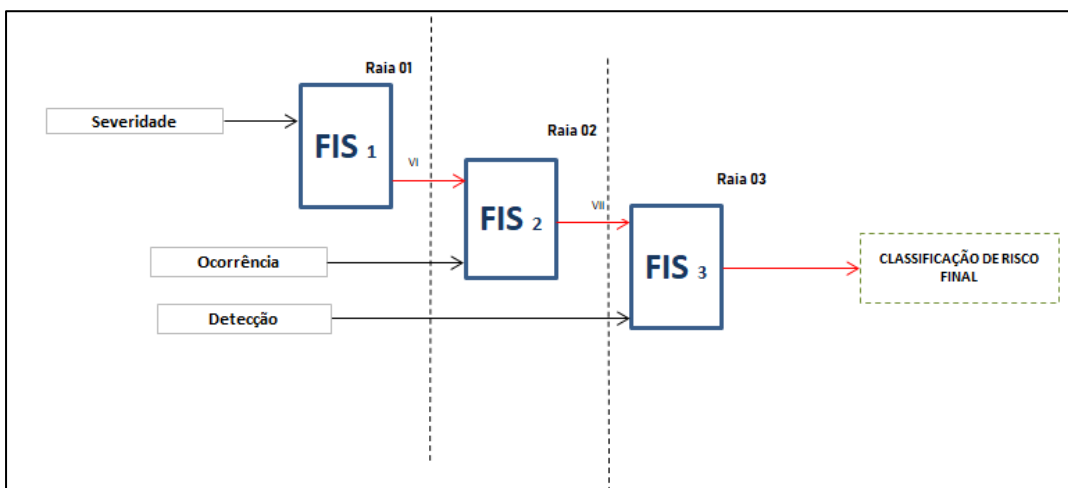


Figura 13 - HFIS para classificação de risco final

Para esse ambiente FIS projetado, o desempenho dos parâmetros de falha S, O e D figuram como variáveis de entrada e as variáveis intermediárias conectam os motores de inferência de cada um desses parâmetros. Em virtude de suas diferenças conceituais, optou-se por restringir um motor de inferência para cada deles, não os agrupando, portanto. As combinações das classificações dos antecedentes das regras e a definição dos conjuntos fuzzy par a cada uma das variáveis linguísticas (severidade, ocorrência e detecção) foram obtidas pelas mesmas premissas descritas na seção 4.2. A Tabela 36 sumariza o resultado dos módulos selecionados para estudo.

Tabela 36 - Desempenho final dos sistemas TVFs.

SISTEMA	CLASSIFICAÇÃO DE RISCO
P-75_M09_S01-TVF	Médio
P-75_M09_S02-TVF	Médio
P-75_M09_S03-TVF	Alto
P-75_M09_S04-TVF	Médio
P-75_M09_S05-TVF	Baixo
P-75_M16_S01-TVF	Médio
P-75_M16_S02-TVF	Médio
P-75_M16_S03-TVF	Médio
P-75_M16_S04-TVF	Médio
P-75_M16_S05-TVF	Médio

P-75_M23_S01-TVF	Alto
P-75_M23_S02-TVF	Alto
P-75_M23_S03-TVF	Alto
P-75_M23_S04-TVF	Alto
P-75_M23_S05-TVF	Alto
P-75_M24_S01-TVF	Alto
P-75_M24_S02-TVF	Baixo
P-75_M24_S03-TVF	Alto
P-75_M24_S04-TVF	Médio
P-75_M24_S05-TVF	Médio
P-75_M24_S06-TVF	Baixo
P-75_M24_S07-TVF	Alto
P-75_M24_S08-TVF	Alto
P-75_M24_S09-TVF	Alto
P-75_M24_S010-TVF	Alto

Os módulos mais críticos foram o M23 e M24, respectivamente. Ambos são classificados como módulos de produção e exercem funções operativas relevantes na dinâmica operacional, a saber, módulo M24 (piperack), projetado para acomodar as tubulações e M23 (Offloading), concentra a função de transportar produtos (petróleo, gás, demais produtos) produzidos pela FPSO, possuindo intensa atividade produtiva. Da classificação obtida é possível empreender que os critérios selecionados foram representativos para o contexto analisado, sinalizando para o tomador de decisão, que há grande concentração de sistemas TVFs críticos naquela localização, devendo, portanto, priorizá-los em relação aos demais.

Para os TVFs localizados no módulo M09, Manifolds, que é um módulo de produção, 60% dos ativos possuem classificação ‘médio’, 20% criticidade alta e 20% criticidade baixa, resultado influenciado pela performance desses ativos em relação a detecção da corrosão, na análise de seus respectivos subconjuntos. Esses, para o parâmetro detecção, foram predominantemente classificados como médio e alto, em virtude da significativa dificuldade de acesso a esses componentes e elevado número de curvas. Além disso, o

parâmetro detecção, na abordagem integrada (fator integrado) recebeu um peso maior dos especialistas para compor a análise global.

Para o módulo de área de carga (M16), único módulo cuja natureza difere dos demais selecionados, módulo em geral, 100% de seus ativos obteve classificação ‘médio’. Para a avaliação de criticidade, considerando os fatores de análise dos subconjuntos, para o parâmetro ‘severidade’, todos os ativos possuem classificação ‘baixo’; para o parâmetro ‘ocorrência’, todos os ativos possuem classificação ‘médio’; e para o parâmetro ‘detecção’, 60% dos ativos receberem classificação ‘médio’ e os demais, classificação ‘alto’.

Considerando, ainda, a natureza prescritiva do framework proposto, foi possível identificar diferenças significativas entre a avaliação feita a nível sistema e a avaliação multinível (sistemas e subsistemas). A incorporação do fator referente aos critérios de avaliação dos conjuntos que compõem os ativos TVFs analisados possibilitou uma avaliação mais robusta em detrimento de uma análise mais alto nível. A abordagem multinível provê classificações mais ‘severas’ que a anterior, dos 24 sistemas analisados, 12 receberam classe de risco ‘alto’, 9 receberam classe de risco ‘médio’ e 3 receberam classificação de risco ‘baixo’, conforme detalha a Tabela 37. Esse cenário era esperado, devido à adição do novo critério de avaliação composto por critérios avaliativos na dimensão multinível e dos pesos que lhes foram atribuídos pelos especialistas (significativamente maior que os demais fatores, principalmente para os do parâmetro de risco ‘ocorrência e ‘detecção’.

Tabela 37 - Comparação das classificações nível e multinível

Visão comparativa Classificação de ativos		
ATIVO	Classificação - Nível sistema	Classificação integrada - Níveis de sistema e subsistema
P-75_M09_S02-TVF	Médio	Médio
P-75_M09_S03-TVF	Médio	Alto
P-75_M09_S04-TVF	Médio	Médio
P-75_M09_S05-TVF	Alto	Baixo
P-75_M16_S01-TVF	Baixo	Médio
P-75_M16_S02-TVF	Baixo	Médio
P-75_M16_S03-TVF	Baixo	Médio
P-75_M16_S04-TVF	Alto	Médio
P-75_M16_S05-TVF	Alto	Médio
P-75_M23_S01-TVF	Médio	Alto
P-75_M23_S02-TVF	Médio	Alto
P-75_M23_S03-TVF	Médio	Alto
P-75_M23_S04-TVF	Médio	Alto

P-75_M23_S05-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S01-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S02-TVF	Médio	Baixo
P-75_M24_S03-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S04-TVF	Médio	Médio
P-75_M24_S05-TVF	Médio	Médio
P-75_M24_S06-TVF	Médio	Baixo
P-75_M24_S07-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S08-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S09-TVF	Médio	Alto
P-75_M24_S10-TVF	Médio	Alto

A prescrição consiste em que ativos com criticidade alta devem ser priorizados em relação aos demais e estes devem ser incluídos nos planos referentes às rotinas de manutenção com vistas a mitigar a corrosão externa, por oportunidade. Nesse caso, a abordagem priorizaria 12 sistemas, em detrimento dos 3 sistemas classificados como ‘alto’ na abordagem anterior. Portanto, considerar fatores mais específicos, que se relacionam ao tipo do ativo analisado e não apenas numa visão alto nível, gera prescrições mais austeras. Por fim, considerando esse cenário geral, espera-se que as classificações obtidas balizem a tomada de decisão o tomador de decisão.

5. Conclusões e considerações finais

Esta pesquisa propõe um framework integrado para FMEA que supera as limitações dos métodos existentes ao incorporar diversas técnicas confiáveis, que incorporou lógica fuzzy e métodos multicritério, com base dados triangulados para realizar uma análise abrangente em ativos complexos, de modo a garantir a confiabilidade dos mesmos. A construção do framework perpassou todos os estágios do FMEA para determinar uma classificação de risco para os ativos complexos. Para cada um dos parâmetros de falha (S, O e D), a análise da performance dos ativos foi feita através da construção de ambientes HFIS específicos, orientado ao conhecimento técnico obtido por especialistas e literatura. Após a obtenção da performance dos ativos, através da análise de criticidade de seus subconjuntos, optou-se por seguir com uma abordagem integrada, avaliando o ativo em dois níveis (subnível – conjuntos TVFs; nível – o ativo TVF completo). Essa abordagem agregou os critérios do subnível em um único critério, a fim de estabelecer uma comparação do ativo completo, através da atribuição de pesos (BWM) e agregação das performances (Fuzzy VIKOR). Isso possibilitou obter uma avaliação integrada de cada um dos parâmetros de falha S, O e D, que foram agregados a partir da construção de um novo ambiente HFIS, para obtenção dos respectivos números de prioridade de risco.

Para validação do artefato, conforme a metodologia utilizada preconiza, um estudo empírico foi empreendido. Os sistemas TVFs localizados em módulos de produção obtiveram classificações de risco mais altas, se comparado com o módulo geral. Esse cenário pode ser explicado, em virtude das classificações obtidas nos HFIS dos parâmetros e dos pesos mais elevados atribuídos aos critérios compostos para cada um dos parâmetros de falha, reafirmando a importâncias dos fatores levantados para análise de cada um dos conjuntos TVF, quais sejam: (i) Tipo de fluido, (ii) Tipo de material, (iii) Tipo de cobertura, (iv) Isolamento térmico, (v) Temperatura da superfície, (vi) Pressão, (vii) Número de conexões, (viii) Presença de itens soldados, (ix) Dificuldade de acesso e (x) Número de curvas. Portanto, a partir dessa avaliação foi possível identificar qual seria a melhor composição de carteira de ativos para rotinas de inspeção e manutenção, indicando para o decisor, que os ativos mais críticos devem ser priorizados em detrimento dos demais.

Em síntese, a presente pesquisa pretende contribuir para a academia, no sentido da propositura de um novo framework prático, de natureza integrada, convergindo o uso de lógica fuzzy e modelos multicritérios, que pode ser aplicado em diferentes domínios, preenchendo as lacunas anteriormente levantadas, a saber: (i) necessidade de abordagens multiníveis e (ii) estudos que mitiguem as limitações do FMEA. Além disso, possui uma contribuição prática, quais sejam: (i) diminuição de custos de manutenção, uma vez que o

core do método sistemático é possibilitar uma clareza na identificação de itens que de fato são críticos e devem ser priorizados, evitando assim que, itens com baixa relevância operacional, considerando o paradigma da criticidade, sejam incluídos no planejamento de manutenção; (ii) mitigação de paradas operacionais inesperadas decorrentes de falhas, haja vista que o modelo viabilizará ao tomador de decisão identificar itens críticos, de modo a balizar ações específicas para esses sistemas, para que eles sejam gerenciados de modo austero evitando assim o colapso de atividades operacionais; (iii) aumento dos níveis de segurança relacionado às dimensões ambientais, sociais e econômicas, pois, uma vez que há o gerenciamento sob o paradigma da confiabilidade, as falhas são antecipadas para serem evitadas.

Ainda faz-se necessário expor as limitações da presente pesquisa, os resultados obtidos não trouxeram muita variação nas classes dos ativos analisados, gerando assim mais um ponto de avaliação subjetiva do decisor, desse modo, indica-se como possível mitigador, a inclusão de mais classes de avaliação. Adicionalmente, como recomendação de trabalhos futuros sugere-se, ainda: (i) A construção de modelos de otimização, para priorizar os sistemas pertencentes à mesma classe de risco, conjugando os recursos operacionais disponíveis; (ii) Ampliar a abordagem do modelo para estabelecer a periodicidade das atividades de manutenção com base na criticidade e (iii) Realizar um estudo ‘horizontal’, de modo a identificar se a percepção dos especialistas de fato foram acuradas e captar novos critérios.

6. Referências bibliográficas

ABBAS, M.; SHAFIEE, M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. **Marine Structures**, v. 71, n. March 2019, p. 102718, 2020a.

ABBAS, M.; SHAFIEE, M. An overview of maintenance management strategies for corroded steel structures in extreme marine environments. **Marine Structures**, v. 71, n. March 2019, p. 102718, 2020b.

ADEOYE-OLATUNDE, O. A.; OLENIK, N. L. Research and scholarly methods: Semi-structured interviews. **JACCP Journal of the American College of Clinical Pharmacy**, v. 4, n. 10, p. 1358–1367, 2021.

ADKINS, S. et al. A new process for manufacturing and stabilizing high-performance EOR surfactants at low cost for high-temperature, high-salinity oil reservoirs. **Proceedings - SPE Symposium on Improved Oil Recovery**, v. 2, p. 1233–1241, 2010.

AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. **Computers and Industrial Engineering**, v. 63, n. 1, p. 135–149, 2012.

ALAMRI, A. H. Localized corrosion and mitigation approach of steel materials used in oil and gas pipelines – An overview. **Engineering Failure Analysis**, v. 116, n. June, p. 104735, 2020.

ALENCAR, M. H.; DE ALMEIDA, A. T. A Multicriteria Decision Model for Assessment of Failure Consequences in the RCM Approach. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2015, 2015.

ALRIFAEY, M. et al. Identification and prioritization of risk factors in an electrical generator based on the hybrid FMEA framework. **Energies**, v. 12, n. 4, 2019.

ALRIFAEY, M. et al. Optimization and Selection of Maintenance Policies in an Electrical Gas Turbine Generator Based on the Hybrid Reliability-Centered Maintenance (RCM) Model. 2020.

AMADI-ECHENDU, J. et al. WHAT IS ENGINEERING ASSET MANAGEMENT? Nalinaksh Vyas. Em: **Springer**. [s.l: s.n.]. p. 3–16.

AMADI, S. A.; UKPAKA, C. P. Performance evaluation of anti-corrosion coating in an oil industry. **Landmark research journals**, v. 1, n. 5, p. 070–081, 2014.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. API RECOMMENDED PRACTICE 580. n. Second Edition, p. 1–96, 2009.

ANIMAH, I.; SHAFIEE, M. Condition assessment, remaining useful life prediction and life extension decision making for offshore oil and gas assets. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 53, p. 17–28, 2018.

ANP. RESOLUÇÃO ANP Nº 43, DE 22.12.2009. p. 1–4, 2009.

ANP. RESOLUÇÃO ANP Nº 02, DE FEV/2010. 2010.

ARENA, S. et al. A novel decision support system for managing predictive maintenance strategies based on machine learning approaches. **Safety Science**, v. 146, n. May 2021, p. 105529, 2022.

ARKSEY, H.; O'MALLEY, L. Scoping studies: Towards a methodological framework. **International Journal of Social Research Methodology: Theory and Practice**, v. 8, n. 1, p. 19–32, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NR-13 CALDEIRAS, VASOS DE PRESSÃO, TUBULAÇÕES E TANQUES METÁLICOS DE ARMAZENAMENTO. p. 1–43, 2018.

AYAZI, M.; MIRFENDERSKI, S.; MOGHADAM, A. A. Study of the corrosion factors in offshore oil production units. v. 48, n. 2, p. 6–10, 2006.

AYU, K.; YUNUSA-KALTUNGO, A. A Holistic Framework for Supporting Maintenance and Asset Management Life Cycle Decisions for Power Systems. **Energies**, v. 13, p. 2–32, 2020.

AZID, N. A. A. et al. Conceptual Analysis and Survey of Total Productive Maintenance (TPM) and Reliability Centered Maintenance (RCM) Relationship. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 530, n. 1, 2019.

BANGARI, P.; NANGARE, K. E.; AL MAZROUEI, K. H. Improving equipment reliability and availability through real-time data. **Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019, ADIP 2019**, 2019.

BASRI, E. I. et al. Preventive Maintenance (PM) planning: a review. v. 23, n. 2, 2017.

BENSON, C. et al. Assessing the common occupational health hazards and their health risks among oil and gas workers. **Safety Science**, v. 140, n. January, p. 105284, 2021.

BETTS, A. J.; BOULTON, L. H. Crevice corrosion: review of mechanisms, modelling, and mitigation. **British Corrosion Journal**, v. 28, 2013.

BORANY, A.; SADKHAN-SMIEEE, S. B. Decision-making approach in Cognitive Radio using Tsukamoto and Mamdani FIS. **1st Babylon International Conference on Information Technology and Science 2021, BICITS 2021**, v. 2021, n. Bicits, p. 144–148, 2021.

BOWEN, GLENN, A. Document Analysis as a Qualitative Research Method. **Qualitative Research Journal**, v. 9, n. 2, p. 27–40, 2009.

BRAGLIA, M. et al. An ensemble-learning model for failure rate prediction. **Procedia Manufacturing**, v. 42, n. 2019, p. 41–48, 2020.

CAIADO, R. G. G. et al. Fuzzy Criticality Assessment of Systems External Corrosion Risks in the Petroleum Industry—A Case Study. **Springer Proceedings in Mathematics and Statistics**, v. 367, p. 153–166, 2021.

CAI, Y. K. et al. Atmospheric and Marine Corrosion: Influential Environmental Factors and Models. n. January 2018, p. 178–186, 2018a.

CAI, Y. K. et al. **Atmospheric and Marine Corrosion: Influential Environmental Factors and Models**. Proceedings of the International Workshop on Environmental Management, Science and Engineering. **Anais...**2018b.

CASALINO, G. et al. A Hierarchical Fuzzy System for Risk Assessment of Cardiovascular Disease. **IEEE Conference on Evolving and Adaptive Intelligent Systems**, v. 2020- May, 2020.

CASSEL, C.; SYMON, G. **Essential guide to qualitative methods in Organizational Research**. [s.l.] SAGE publication, 2004.

CATELANI, M. et al. Optimizing Maintenance Policies for a Yaw System Using Reliability-Centered Maintenance and Data-Driven Condition Monitoring. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 69, n. 9, p. 6241–6249, 2020.

CHANDIMA RATNAYAKE, R. M.; MARKESET, T. Maintaining technical integrity of petroleum flowlines on offshore installations: A decision support system for inspection planning. **Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE**, v. 6, p. 1–11, 2010.

CHIMA, C. M. Supply-Chain Management Issues In The Oil And Gas Industry. **Journal of Business & Economics Research**, v. 05, n. 06, p. 27–36, 2007.

DEKKER, R. Applications of maintenance optimization models: A review and analysis. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 51, n. 3, p. 229–240, 1996.

DELGADO, M.; VERDEGAY, J. L.; VILA, M. A. Linguistic decision-making models. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 7, n. 5, p. 479–492, 1992.

DELLERMANN, D. et al. Design principles for a hybrid intelligence decision support system for business model validation. **Electronic Markets**, v. 29, n. 3, p. 423–441, 2019.

DICK, S.; KANDEL, A. Comment on “Combinatorial rule explosion eliminated by a fuzzy rule configuration”. **IEEE Transactions on Fuzzy Systems**, v. 7, n. 4, p. 475–477, 1999.

ERIKSEN, S.; UTNE, I. B.; LÜTZEN, M. An RCM approach for assessing reliability challenges and maintenance needs of unmanned cargo ships. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 210, n. December 2020, p. 107550, 2021.

EUROPEAN COMMITTEE FOR ELECTROTECHNICAL STANDARDIZATION. Dependability management - Part 3-11: Application guide - Reliability centred maintenance. **International Organization for Standardization**, v. IEC 60300-, 2009.

FRASER, K.; HVOLBY, H.-H.; TSENG., T.-L. B. Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence. A greater practical focus is needed. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 1, p. 1–31, 2015.

F. STANLEY, N.; HOWARD F., H. Reliability-centered Maintenance. **Elsevier**, 1978.

FUENTES-HUERTA, M. A. et al. RCM implementation on plastic injection molding machine considering correlated failure modes and small size sample. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 95, n. 9–12, p. 3465–3473, 2018.

GARCÍA MÁRQUEZ, F. P. et al. Condition monitoring of wind turbines: Techniques and methods. **Renewable Energy**, v. 46, p. 169–178, 2012.

GEISBUSH, J.; ARIARATNAM, S. T. Reliability centered maintenance (RCM): literature review of current industry state of practice. **Journal of Quality in Maintenance Engineering**, 2022.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6º edição ed. [s.l.] LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2017.

GERAMIAN, A. et al. Fuzzy inference system application for failure analyzing in automobile industry. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 9, n. 34, p. 1493–1507, 2017.

GERRING, J. What is a case study and what is it good for? **American Political Science Review**, v. 98, n. 2, p. 341–354, 2004.

GHAITHAN, A. M.; ATTIA, A.; DUFFUAA, S. O. Multi-objective optimization model for a downstream oil and gas supply chain. **Applied Mathematical Modelling**, v. 52, p. 689–708, 2017.

GREGOR, S.; HEVNER, A. R. Positioning and presenting design science research for maximum impact. **MIS Quarterly: Management Information Systems**, v. 37, n. 2, p. 337–355, 2013.

GROYSMAN, A. Corrosion problems and solutions in oil, gas, refining and petrochemical industry. **Koroze a Ochrana Materialu**, v. 61, n. 3, p. 100–117, 2017.

GUPTA, G.; MISHRA, R. P. A Failure Mode Effect and Criticality Analysis of Conventional Milling Machine Using Fuzzy Logic: Case Study of RCM. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 33, n. 2, p. 347–356, 2017.

GUPTA, G.; MISHRA, R. P.; SINGHVI, P. An Application of Reliability Centered Maintenance Using RPN Mean and Range on Conventional Lathe Machine. **International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1–10, 2016.

HASHEMI, M.; ASADI, M.; ZAREZADEH, S. Optimal maintenance policies for coherent systems with multi-type components. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 195, n. September 2019, p. 106674, 2020.

HEALE, R.; FORBES, D. Understanding triangulation in research. **Evidence-Based Nursing**, v. 16, n. 4, p. 98, 2013.

HEVNER, A., MARCH, S., PARK, J., & RAM, S. Design science in information systems research. **MIS Quarterly**, v. 28, p. 75–105, 2004.

HORIUCHI, D. N.; HIHARA, L. H. **The Effects of Solar Radiation on the Surface Temperatures of Various Alloys Exposed to Atmospheric Corrosion Conditions**. NACE INTERNATIONAL. **Anais...**2015.

HU-CHEN, L. et al. Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review. **Computers and Industrial Engineering**, v. 135, n. October 2018, p. 881–897, 2019.

HU, W.; BAO, J.; HU, B. Trend and progress in global oil and gas exploration. **Petroleum Exploration and Development**, v. 40, n. 4, p. 439–443, 2013.

IBISWORLD. **Global Oil & Gas Exploration & Production Industry - Market Research Report**. Disponível em: <<https://www.ibisworld.com/global/market-research-reports/global-oil-gas-exploration-production-industry/>>.

IGDER, M. A. et al. Reliability and Safety Improvement of Emission-Free Ships: Systemic Reliability-Centered Maintenance. **IEEE Transactions on Transportation Electrification**, v. 7, n. 1, p. 256–266, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Guia de inspeção - Mecanismos de danos**. , 2021.

IQBAL, H. et al. Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 13, n. 6, p. 794–815, 2017.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, M.; GOLA, A. Maintenance 4.0 Technologies for Sustainable Manufacturing - An Overview. **IFAC-PapersOnLine**, v. 52, n. 10, p. 91–96, 2019.

JAVAHERDASHTI, R. How corrosion affects industry and life. **Anti-Corrosion Methods and Materials**, v. 47, n. 1, p. 30–34, 2000.

JURIŠIĆ, P.; PARUNOV, J.; GARBATOV, Y. Aging effects on ship structural integrity. **Brodogradnja**, v. 68, n. 2, p. 15–28, 2017.

KABIR, G.; SADIQ, R.; TESHAMARIAM, S. A fuzzy Bayesian belief network for safety assessment of oil and gas pipelines. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 8, p. 874–889, 2016.

KERE, K. J.; HUANG, Q. Life-Cycle Cost Comparison of Corrosion Management Strategies for Steel Bridges. **Journal of Bridge Engineering**, v. 24, n. 4, p. 1–16, 2019.

KHAN, S. A. et al. Supplier sustainability performance evaluation and selection: A framework and methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 205, p. 964–979, 2018.

KHAZRAEI, K.; DEUSE, J. A strategic standpoint on maintenance taxonomy. **Journal of Facilities Management**, v. 9, n. 2, p. 96–113, 2011.

KLIR, G. J. ; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: Theory and applications**. [s.l: s.n.].

KOCH, G. **Cost of corrosion**. [s.l.] Elsevier Ltd, 2017.

KREINOVICH, V.; KOSHELEVA, O.; SHAHBAZOVA, S. N. Why Triangular and Trapezoid Membership Functions: A Simple Explanation. **Studies in Fuzziness and Soft Computing**, v. 391, p. 25–31, 2018.

KUMARI, S. et al. Failure mode and effects analysis of common effluent treatment plants of humid sub-tropical regions using fuzzy based MCDM methods. **Engineering Failure Analysis**, v. 145, n. November 2022, p. 107010, 2023.

LACERDA, D. P. et al. Design Science Research: A research method to production engineering. **Gestao e Producao**, v. 20, n. 4, p. 741–761, 2013.

LESSARD, L.; YU, E. Using Design Science Research to Develop a Modeling Technique for Service Design Conference. p. 1–10, 2012.

LI, C. et al. Pipelines reliability assessment considering corrosion-related failure modes and probability distributions characteristic using subset simulation. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 178, n. August, p. 226–239, 2023.

LIMA, F. D. O. **Avaliação de alternativas de isolamentos térmicos para prevenção de corrosão sob isolamento aplicado à indústria Offshore**. [s.l: s.n.].

LIU, H. C.; LIU, L.; LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828–838, 2013a.

LIU, H. C.; LIU, L.; LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828–838, 2013b.

LIU, J. et al. Determinants of oil footprints embodied in sino-us trade: A perspective from the globalizingworld. **Energies**, v. 13, n. 15, 2020.

LIU, L. et al. AI-facilitated coating corrosion assessment system for productivity enhancement. **Proceedings of the 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, ICIEA 2018**, p. 606–610, 2018.

LI, X. et al. Optimal maintenance strategy for corroded subsea pipelines. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 49, p. 145–154, 2017.

LO, H. W.; LIOU, J. J. H. A novel multiple-criteria decision-making-based FMEA model for risk assessment. **Applied Soft Computing Journal**, v. 73, p. 684–696, 2018.

LÓPEZ-CAMPOS, M. A.; CRESPO MÁRQUEZ, A.; GÓMEZ FERNÁNDEZ, J. F. Modelling using UML and BPMN the integration of open reliability, maintenance and condition monitoring

management systems: An application in an electric transformer system. **Computers in Industry**, v. 64, n. 5, p. 524–542, 2013.

MAGALDI, D.; BERLER, M. Semi-structured Interviews. **Encyclopedia of Personality and Individual Differences**, p. pp 4825–4830, 2020.

MAHMOODZADEH, Z. et al. Condition-based maintenance with reinforcement learning for dry gas pipeline subject to internal corrosion. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 19, p. 1–26, 2020.

MAMDANI, E. H. Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. **IEEE Transactions on Computers**, v. C–26, n. 12, p. 1182–1191, 1977.

MARTORELL, S. et al. Maintenance modeling and optimization integrating human and material resources. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 95, n. 12, p. 1293–1299, 2010.

MCINTOSH, M. J.; MORSE, J. M. Situating and Constructing Diversity in Semi-Structured Interviews. 2015.

MEHRJERDI, Y. Z. Developing Fuzzy TOPSIS Method based on Interval-valued Fuzzy Sets. **International Journal of Computer Applications**, v. 42, n. 14, p. 7–18, 2012.

MISHRA, M.; KESHAVARZZADEH, V.; NOSHADRAVAN, A. Reliability-based lifecycle management for corroding pipelines. **Structural Safety**, v. 76, n. June 2018, p. 1–14, 2019.

MOAN, T. Reliability-based management of inspection, maintenance and repair of offshore structures. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 1, n. 1, p. 33–62, 2005.

MOON, M. D. Triangulation: A Method to Increase Validity, Reliability, and Legitimation in Clinical Research. **Journal of Emergency Nursing**, v. 45, n. 1, p. 103–105, 2019.

MOUBRAY, J. **Reliability Centered Maintenance**. 2nd. ed. [s.l: s.n.].

MUNN, Z. et al. Systematic review or scoping review? Guidance for authors when choosing between a systematic or scoping review approach. **BCM Medical Research Methodology**, p. 1–7, 2018.

NAGALAKSHMI, T.; SIVASAKTHI, A. Corrosion Control , Prevention and Mitigation in Oil & Gas Industry. **International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)**, v. 9, n. 2, p. 6, 2019.

NEGI, H.; VERMA, P.; SINGH, R. K. A comprehensive review on the applications of functionalized chitosan in petroleum industry. **Carbohydrate Polymers**, v. 266, n. April, p. 118125, 2021.

NI, S. et al. Risk identification and quantitative assessment method of offshore platform equipment. **Energy Reports**, v. 8, p. 7219–7229, 2022.

NIXON, J.; PENA, E. The evolution of asset management: Harnessing digitalization and data analytics. **Proceedings of the Annual Offshore Technology Conference**, v. 2019- May, 2019.

OKE, S. A. et al. A fuzzy safety control framework for oil platforms. **International Journal of Quality and Reliability Management**, v. 23, n. 5, p. 564–582, 2006.

OLAJIRE, A. A. Corrosion inhibition of offshore oil and gas production facilities using organic compound inhibitors - A review. **Journal of Molecular Liquids**, v. 248, p. 775–808, 2017.

OPRICOVIC, S. Fuzzy VIKOR with an application to water resources planning. **Expert Systems with Applications**, v. 38, n. 10, p. 12983–12990, 2011.

OUYANG, L. et al. An interval probability-based FMEA model for risk assessment: A real-world case. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 36, n. 1, p. 125–143, 2020.

PAILLUSSEAU, C. et al. Gamechanging structural repair solution for FPSO hulls with no hot work. **Society of Petroleum Engineers - SPE International Oilfield Corrosion Conference and Exhibition 2018**, 2018.

PANENKA, A. et al. Reliability assessment of ageing infrastructures: an interdisciplinary methodology. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 16, n. 4, p. 698–713, 2020.

PATRO, S. G. K.; SAHU, K. K. Normalization: A Preprocessing Stage. **Computer Science & Information Technology (CS & IT)**, p. 20–22, 2015.

PEFFERS, K. et al. A design science research methodology for information systems research. **Journal of Management Information Systems**, v. 24, n. 3, p. 45–77, 2007.

PEREIRA, V. **pyDecision 4.3.9**.

PETCHROMPO, S.; PARLIKAD, A. K. A review of asset management literature on multi-asset systems. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 181, n. March 2018, p. 181–201, 2019.

PETROBRAS. **PE-2SMS-00058: Definições de SMS para o processo de inspeção no E&P**, 2021.

PETROBRAS. **Tipos de plataformas utilizadas na bacia de santos**. Disponível em: <<https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/content/tipos-de-plataformas-utilizadas-na-bacia-de-santos.html>>.

PETROBRAS. **TOPSIDES - PIPING SPECIFICATION**. 2023.

PIECHNICKI, F. et al. Data fusion framework for decision-making support in reliability-centered maintenance. **Journal of Industrial and Production Engineering**, v. 38, n. 1, p. 1–17, 2021.

POPOOLA, L. T. et al. Corrosion problems during oil and gas production and its mitigation. **International Journal of Industrial Chemistry**, v. 4, n. 1, p. 1–15, 2013.

POURAHMADI, F.; FOTUHI-FIRUZABAD, M.; DEHGHANIAN, P. Application of game theory in reliability-centered maintenance of electric power systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 53, n. 2, p. 936–946, 2017.

POURJAVAD, E.; SHAHIN, A. The Application of Mamdani Fuzzy Inference System in Evaluating Green Supply Chain Management Performance. **International Journal of Fuzzy Systems**, v. 20, n. 3, p. 901–912, 2018.

PRASETYO, Y. T.; MERCADO ROSITA, K. K. Equipment Reliability Optimization Using Predictive Reliability Centered Maintenance: A Case-Study Illustration and Comprehensive Literature Review. **2020 7th International Conference on Frontiers of Industrial Engineering, ICFIE 2020**, p. 93–97, 2020.

PRISMA. **Welcome to the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) website!**

PWC. Impacts of the Oil and Natural Gas Industry on the US Economy in 2019. n. July, 2021.

RAJU, G. V. S.; ZHOU, J.; KISNER, R. A. Hierarchical fuzzy control. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**, v. 54, n. 5, p. 1201–1216, 1991.

RAKYTA, M. et al. Proactive approach to smart maintenance and logistics as a auxiliary and service processes in a company. **Journal of Applied Engineering Science**, v. 14, n. 4, p. 433–442, 2016.

RATNAYAKE, R. M. C. Application of a fuzzy inference system for functional failure risk rank estimation: RBM of rotating equipment and instrumentation. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, v. 29, n. 1, p. 216–224, 2014.

RAZAK, T. R. et al. Decomposing Conventional Fuzzy Logic Systems to Hierarchical Fuzzy Systems. **IEEE International Conference on Fuzzy Systems**, p. 1–7, 2023.

REVIE, R. W.; UHLIG, H. H. **Corrosion and Corrosion Control: An Introduction to Corrosion Science and Engineering: Fourth Edition**. [s.l: s.n.].

REZAEI, J. Best-worst multi-criteria decision-making method. **Omega (United Kingdom)**, v. 53, p. 49–57, 2015.

REZAEI, J. et al. A supplier selection life cycle approach integrating traditional and environmental criteria using the best worst method. **Journal of Cleaner Production**, v. 135, p. 577–588, 2016.

RIOS, M. P. **Automation of corrosion inspection and diagnosis through digital image analysis and maintenance prioritization on offshore assets**. [s.l: s.n.].

ROSS, T. J. **Fuzzy logic with engineering applications**. second edi ed. [s.l: s.n.].

SABRI, N. et al. Fuzzy inference system: Short review and design. **International Review of Automatic Control**, v. 6, n. 4, p. 441–449, 2013.

SAJARADJ, Z.; HUDA, L. N.; SINULINGGA, S. The Application of Reliability Centered Maintenance (RCM) Methods to Design Maintenance System in Manufacturing (Journal Review). **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 505, n. 1, 2019.

SANDU, G.; VARGANOVA, O.; SAMII, B. Managing physical assets: a systematic review and a sustainable perspective. **International Journal of Production Research**, 2022.

SANKOFA, N. Critical method of document analysis. **International Journal of Social Research Methodology**, v. 26, n. 6, p. 745–758, 2022.

SELVIK, J. T.; AVEN, T. A framework for reliability and risk centered maintenance. **Reliability Engineering and System Safety**, v. 96, n. 2, p. 324–331, 2011.

SILLIVANT, D. Reliability centered maintenance cost modeling: Lost opportunity cost. **Proceedings - Annual Reliability and Maintainability Symposium**, p. 2–6, 2015.

SILVA, R. DE C. F. S. et al. Applications of biosurfactants in the petroleum industry and the remediation of oil spills. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 15, n. 7, p. 12523–12542, 2014.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G. R. **Rcm-Gateway To World Class Maintenance**. **Butterworth-Heinemann**. [s.l: s.n.].

SOLTANALI, H.; ROHANI, A. An improved fuzzy inference system-based risk analysis approach with application to automotive production line. **Neural Computing and Applications**, v. 32, n. 14, p. 10573–10591, 2020.

STEMLER, S. E. A comparison of consensus, consistency, and measurement approaches to estimating interrater reliability. **Practical Assessment, Research and Evaluation**, v. 9, n. 4, 2004.

SWANSON, L. Linking maintenance strategies to performance. **International Journal of Production Economics**, v. 70, n. 3, p. 237–244, 2001.

THURMOND, V. A. The point of triangulation. **Journal of Nursing Scholarship**, v. 33, n. 3, p. 253–258, 2001.

TORRA, V. A review of the construction of hierarchical fuzzy systems. **International Journal of Intelligent Systems**, v. 17, n. 5, p. 531–543, 2002.

UHLIG, H. H. **UHLIG'S CORROSION HANDBOOK**. 3rd ed. [s.l.] THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY SERIES, 2011.

VAN DER LEI, T.; HERDER, P.; WIJNIA, Y. **Asset management: The state of the art in Europe from a life cycle perspective**. [s.l: s.n.]. v. 9789400727

VENABLE, J.; PRIES-HEJE, J.; BASKERVILLE, R. FEDS: A Framework for Evaluation in Design Science Research. **European Journal of Information Systems**, v. 25, n. 1, p. 77–89, 2016.

VOM BROCKE, J.; HEVNER, A.; MAEDCHE, A. Introduction to Design Science Research. p. 1–13, 2020.

WANG, Y. et al. A corrective maintenance scheme for engineering equipment. **Engineering Failure Analysis**, v. 36, p. 269–283, 2014.

WARNER, J. **scikit-fuzzy 0.4.2**. Disponível em: <<https://pypi.org/project/scikit-fuzzy/>>.

WU, W. et al. **Risk analysis of corrosion failures of equipment in refining and petrochemical plants based on fuzzy set theory.** *Engineering Failure Analysis*, 2013.

YANG, J.; LOURENÇO, M. I.; ESTEFEN, S. F. International Journal of Pressure Vessels and Piping Thermal insulation of subsea pipelines for different materials. **International Journal of Pressure Vessels and Piping**, v. 168, n. September, p. 100–109, 2018.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338–353, 1965.

ZANON, L. G. et al. A decision making model based on fuzzy inference to predict the impact of SCOR® indicators on customer perceived value. **International Journal of Production Economics**, v. 223, n. September, p. 107520, 2020.

ZENG, W.; LI, H. Weighted triangular approximation of fuzzy numbers. **International Journal of Approximate Reasoning**, v. 46, n. 1, p. 137–150, 2007.

ZIMMERMANN, H. J. Fuzzy set theory. **Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics**, v. 2, n. 3, p. 317–332, 2010.

Apêndice A - Revisão de escopo

A presente revisão de escopo foi conduzida com vistas à identificar os fatores listados na literatura que se associam ao fenômeno de corrosão externa nos ativos offshore do setor de óleo e gás. “Framework de apoio à decisão para avaliação de criticidade de ativos na gestão da corrosão externa: Uma abordagem fuzzy multicritério aplicada à indústria de Óleo & Gás”, que será apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

A metodologia adotada para compreender de maneira ampla quais são os fatores de risco associados à corrosão, empregados em rotinas de manutenção de ativos da indústria de O&G foi a revisão de escopo, uma vez que possibilita a identificação de evidências em um determinado campo através de mapeamento de conceitos-chave à este relacionado, suas principais fontes e tipos de evidências (ARKSEY; O'MALLEY, 2005; MUNN et al., 2018). O presente estudo fundamenta-se na prescrição de (MUNN et al., 2018) que indica a condução de uma revisão de escopo para fins de identificação dos tipos de evidências disponíveis em um determinado campo.

Conforme Arksey e O'Malley (2005) sugeriram em seu framework conceitual, uma revisão de escopo pode ser operacionalizada através de alguns estágios, os quais são iterativos, ou seja, preveem que os pesquisadores avancem em cada estágio cientes de que podem repetir estágios anteriores para garantir a abrangência do estudo. Tais estágios são: i) Identificação da pergunta de pesquisa; ii) Identificação de estudos relevantes; iii) Seleção dos estudos; iv) Mapeamento de dados; e, por fim, v) Agrupamento, resumo e relato dos resultados. A pergunta de pesquisa que norteou o presente estudo foi: Quais são os fatores de risco associados à corrosão empregados em rotinas de manutenção de ativos da Indústria de O&G? A qual se relaciona com o objetivo de pesquisa proposto, uma vez que se configura como parte fundamental do levantamento de informações para a propositura do framework a ser proposto, cumprindo, assim, o primeiro estágio. Conforme sugerido por (ARKSEY; O'MALLEY, 2005), as perguntas de pesquisa orientam às estratégias de busca e devem seguir uma abordagem ampla para garantir a amplitude de cobertura.

A identificação de estudos relevantes, segundo estágio, designa que sejam feitas buscas de evidências de pesquisa por meio de fontes diversas. Para o presente estudo, essa etapa foi conduzida nas bases de dados eletrônicas *Scopus* e *Web of Science*, em virtude de suas relevâncias em pesquisa em operações, tendo em vista, também, seus amplos repositórios de literatura científica revisada por pares e a questão da indexação de diversos periódicos. A *query* de busca utilizada foi composta pela combinação de eixos que designam, respectivamente, estratégias de manutenção, conotações relativas à criticidade e as palavras que designam a mesma ideia dentro da temática de manutenção, o setor/indústria, tomada de decisão e, por fim, corrosão, como detalhado a seguir: ("*corrective maintenance*" OR "*reactive maintenance*" OR "*preventive maintenance*" OR "*proactive maintenance*" OR "*predictive maintenance*" OR "*immediate reactive maintenance*" OR "*scheduled reactive maintenance*" OR "*deferred reactive maintenance*" OR "*failure-based maintenance*" OR "*operate to failure*" OR "*age-based maintenance*" OR "*block-based maintenance*" OR "*constant interval maintenance*" OR "*fixed time maintenance*" OR "*inspection-based maintenance*" OR "*life-based maintenance*" OR "*planned preventive maintenance*" OR

"time-based maintenance" OR "use-based maintenance" OR "availability centered maintenance" OR "business centered maintenance" OR "design-out maintenance" OR "risk-based maintenance" OR "reliability-centered maintenance" OR "total productive maintenance" OR "avoidance-based maintenance" OR "condition-based maintenance" OR "detective-based maintenance") AND ("reliability" OR "critical*" OR "risk") AND ("oil" OR "gas" OR "petroleum" OR "energy" OR "offshore") AND ("decision mak*" OR "decision-mak*") AND ("corros*"), cuja premissa principal foi a de considerar produções somente em inglês, em virtude de ser a língua de maior concentração de trabalhos acadêmicos. Além disso, não foram impostas limitações relativas aos anos de publicação. Destaca-se também, que as buscas de todos os eixos foram feitas nos campos: título do artigo, resumo e palavras-chave. Operacionalizando, portanto, o que foi exposto, a busca retornou 19 documentos, concluindo assim o segundo estágio. Os estágios de identificação e seleção estão ilustrados no diagrama de fluxo PRISMA, conforme Figura 14.

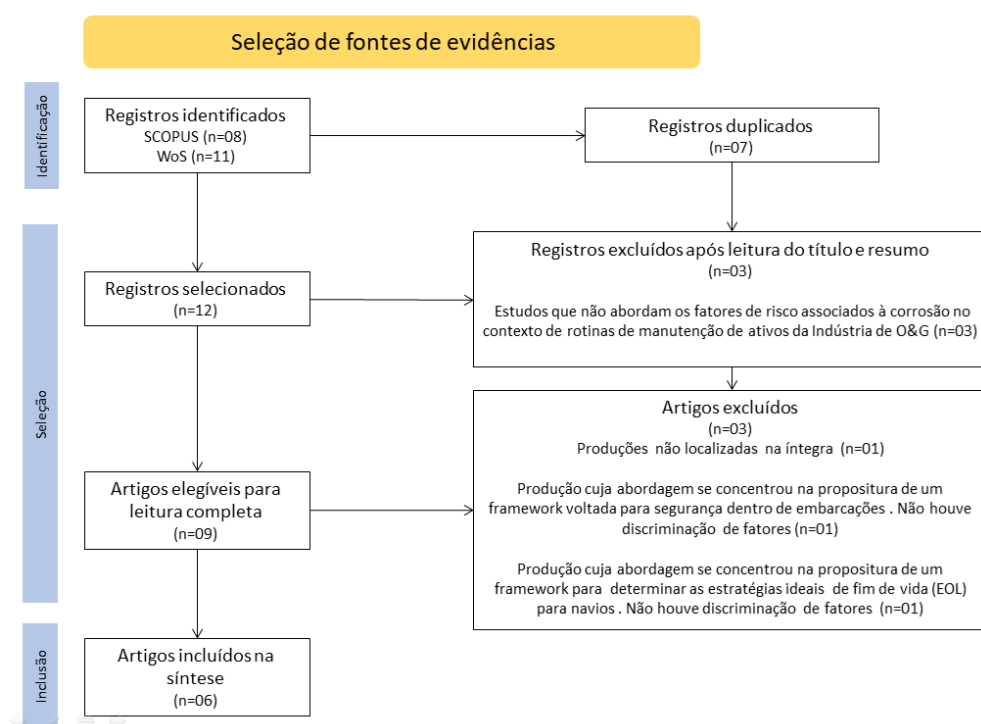


Figura 14 -Diagrama PRISMA

O PRISMA é ferramenta que descreve o fluxo de informações do mapeamento dos registros identificados, evidenciando, assim, os critérios de inclusão e exclusão, bem como o número de documentos enquadrados em cada um deles (PRISMA, 2022). Na etapa de seleção de documentos, três critérios de exclusão, que possibilitem a eliminação de estudos que não se relacionam com as perguntas de pesquisa, foram fixados, a saber: (i) estudos que não abordam os fatores de risco associados à corrosão no contexto de rotinas de

manutenção de ativos da Indústria de O&G; (ii) produções não localizadas na íntegra; (iii) produções cujas abordagens se concentraram na propositura de framework voltados para questões que não contemplavam os fatores que se associavam à corrosão.

A fim de identificar se os documentos selecionados não estavam enquadrados nos critérios de exclusão, as informações advindas do título, resumo e palavras-chave foram analisadas. Em consequência disso, 09 artigos foram selecionados para leitura completa, os quais foram submetidos a um novo processo de busca, agora para ter acesso à produção científica completa. Dessa ação, 08 artigos foram localizados e o artigo restante, apenas 10, foi classificado como indisponíveis, uma vez que para acessá-lo seria necessário ter uma assinatura em banco de dados específico. Por fim, restaram, então, 08 artigos para leitura completa, dentre os quais, após a condução da leitura completa, identificou-se 2 pesquisas que não abordavam o tema de interesse.

A partir dos artigos que compõe a amostra final, 06 pesquisas, um mapeamento dos dados foi empreendido, de modo a sintetizar e interpretar as informações-padrão coletadas em cada estudo, sejam elas questões-chaves que se relacionam com o objetivo do estudo (ARKSEY; O'MALLEY, 2005). Adicionalmente, com vistas a responder as perguntas de pesquisa fixadas inicialmente, uma análise de conteúdo foi realizada, de modo a evidenciar questões centrais correlacionadas às mesmas.

Apêndice B - Compilado da classificação dos critérios de avaliação dos ativos

O presente apêndice foi estruturado para sumarizar as regras de avaliação para a classificação das variáveis de entrada dos ambientes de análise HFIS destinados a prover as classificações dos ativos para os parâmetros de falha ‘severidade’, ‘ocorrência’ e ‘detecção’. “Framework de apoio à decisão para avaliação de criticidade de ativos na gestão da corrosão externa: Uma abordagem fuzzy multicritério aplicada à indústria de Óleo & Gás”, que será apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Industrial.

As variáveis de entrada, que consistem nos critérios de avaliativos, categorizadas em S, O e D foram analisadas e classificadas considerando a base de dados dos ativos selecionados. Os quais foram obtidos, a partir de um processo de extração de dados, seguido pela técnica de pré-processamento de dados de limpeza da base, retirando dados ausentes e dados que não se relacionavam com os critérios de análise, garantindo, assim, que a base resultante, conteria apenas os dados relevantes para a análise, ou seja, os dados que permitiriam avaliar as variáveis aqui arroladas. Para a definição dessas regras foram incorporados conhecimentos de especialistas e diretrizes da literatura especializada (técnica e acadêmica).

- **TIPO DE FLUIDO:** O PE-2SMS-00058 (PETROBRAS, 2021) e a (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2018) catalogam os fluidos com base em classes distintas que designam riscos associados ao comprometimento de sua contenção, em relação ao meio que transitam, e à integridade estrutural, respectivamente. Propõe-se, portanto, um tipo de classificação e avaliação dos fluidos, conforme Tabela 38, com base nessas documentações.

Tabela 38 -Classificação de risco dos tipos de fluidos

Tipo de fluido	Classificação de risco
- Fluidos inflamáveis - Fluidos combustíveis - Substâncias tóxicas - Correntes de água e fluido hidráulico (alta pressão) - Vapor de alta pressão	Alto
- Água produzida - Água oleosa - Água de sistemas de utilidades ou para consumo humano - Ar comprimido - Esgoto sanitário - Óleo lubrificante, diesel ou outros produtos químicos combustíveis que operem com temperaturas abaixo do ponto de fulgor - Fluido hidráulico - Demais tipos de fluidos que não foram classificados como alto risco	Baixo

Embora essa tenha sido a classificação adotada na base de fluidos circulantes nos conjuntos de tubulações e equipamentos analisados, foram identificados fluidos que não pertenciam a nenhuma das duas classes propostas, mas foram classificados por alto risco, pois continham o rótulo de corrosivo.

- **TIPO DE MATERIAL:** Embora haja na literatura estudos que abordem as taxas de corrosão das categorias de materiais elencadas na seção 4.1.3, cada qual utiliza de parâmetros distintos, dificultando a comparabilidade de riscos entre eles. Em virtude disso, optou-se pela utilização da tabela prática em água do mar, mesmo possuindo cunho mais generalista. Desse modo, a classificação de risco das categorias de materiais em questão pode ser observada na Tabela 39.

Tabela 39 - Ordenação da criticidade de materiais

Classe de material	Classificação de risco	Referência
Aço carbono	Médio	Gentil (2017)
Aços inoxidáveis	Baixo	Gentil (2017)
Cobres e ligas de cobres	Baixo	Gentil (2017)
Ferros	Alto	Gentil (2017)
Aços de média e baixa liga	Médio	Gentil (2017)
Materiais de vedação	Não avaliável	-
Metálico	Não avaliável	-
Níquel e Ligas de níquel	Médio	Gentil (2017)
Outros materiais	Não avaliável	-
Não-Metálico	Baixo	Gentil (2017)

Indefinido

Não avaliável

-

A maior classificação de risco atribuída a quaisquer itens que pertençam ao conjunto será adotada para todo o conjunto (fator de segurança), garantindo, portanto, que o material com a maior classificação de risco será considerado nos planejamentos como crítico.

- **TIPO DE COBERTURA:** Nas instalações offshore objeto do estudo empírico dessa pesquisa, os tipos de cobertura dos metais são informações de projeto (PETROBRAS, 2023), portanto, dimensionadas considerando as particularidades dos mesmos e sua funcionalidade. Em virtude disso, considerar que um tipo de cobertura oferte mais ou menos risco sob o paradigma analisado se mostra contraproducente. Desse modo, a classificação de risco se baseia na presença ou ausência de cobertura, conforme Tabela 40.

Tabela 40 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme cobertura

Cobertura	Classificação de risco
- Sem cobertura	Alto
- Com cobertura	Baixo

- **ISOLAMENTO TÉRMICO:** Os diferentes tipos de isolamento térmico presentes nos TVFs designam a apresentação ou não de condições que favorecem o processo corrosivo. O isolamento de proteção pessoal permite a rápida evaporação de água, mitigando a umidade, portanto, a classificação de risco dos ativos resume-se conforme Tabela 41.

Tabela 41 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme isolamento

Tipo de Isolamento Térmico	Classificação de risco
- Isolamento para proteção pessoal	Baixo
- Sem isolamento	
- Isolamento para conservação de energia	Alto

TEMPERATURA: A análise dos ativos offshore feita com base na temperatura de operação do ativo considera que temperaturas mais elevadas denotam maior classificação de risco, enquanto que temperaturas menores, menor classificação de risco. A classificação de risco dos ativos, objeto de estudo dessa pesquisa, será feita por meio da análise de

frequência das temperaturas, haja vista a necessidade de comparação entre os mesmos. As temperaturas de operação já medidas foram divididas em três grupos, conforme Tabela 42. O grupo de menor temperatura possui classificação ‘baixa’, o grupo de temperatura amena, classificação ‘média’ e, por fim, o grupo de altas temperaturas, classificação ‘alta’.

Tabela 42 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme temperatura

Faixas de temperatura	Classificação de risco
0°C – 29,85°C	Baixo
30°C – 58°C	Médio
59,85°C – 496°C	Alto

- **PRESSÃO:** A análise dos ativos offshore feita com base na pressão de operação dos ativos considerou como paradigma que ativos que operam em pressões mais altas, possuem maior classificação de risco, e os que operam em pressões menores, menor classificação de risco. Nesse sentido, a avaliação é feita, também, por meio da análise de frequência, conforme Tabela 43.

Tabela 43 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme pressão

Faixas de pressão	Classificação de risco
0 bar – 3,92 bar	Baixo
4 bar – 19 bar	Médio
20 bar – 549 bar	Alto

- **NÚMERO DE CONEXÕES:** Quanto ao número de conexões, a classificação proposta foi: quanto maior o número de conexões, maior a sua classificação de risco, por consequente, quanto menor o número de conexões, menor a sua classificação. Esse fator é analisado também, de acordo com a análise de frequência, conforme Tabela 44.

Tabela 44 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme número de conexões

Faixas de número de conexões	Classificação de risco
0 – 12	Baixo
13 – 36	Médio
37 – 59	Alto

-**ITENS SOLDADOS:** Os conjuntos de interesse que designam soldas em campo possuem uma classificação de risco mais críticas em detrimento aos que não possuem, conforme Tabela 45.

Tabela 45 - Criticidade dos ativos conforme presença/ausência de itens soldados

Itens soldados	Classificação de risco
Ausência	Baixo
Presença	Alto

- **DIFICULDADE DE ACESSO:** Um indicativo da dificuldade de acesso aos itens que compõem o conjunto de tubulações que foram avaliadas é o número de itens que compõe o conjunto. Quanto mais itens compõem o conjunto denota uma possível dificuldade de avaliação de todos os itens, portanto, propõe-se a classificação conforme Tabela 46.

Tabela 46 - Ordenação da criticidade dos ativos conforme dificuldade de acesso

Faixas de número de componentes	Classificação de risco
1 – 18	Baixo
19 – 55	Médio
56 – 129	Alto

-**NÚMERO DE CURVAS:** A classificação de risco mais gravosa será a que tiver mais curvas em seu conjunto, conforme sumarizada na Tabela 47.

Tabela 47 - Criticidade dos ativos conforme faixas de número de curvas

Faixas de número de curvas	Classificação de risco
0 – 5	Baixo
6 – 15	Médio
20 – 47	Alto