



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

MARIANA SOUZA MENEZES

**MODELO DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PARA  
SISTEMA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO**

Recife

2022

MARIANA SOUZA MENEZES

MODELO DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PARA  
SISTEMA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Gerência de produção.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante

Recife

2022

Catálogo na fonte  
Bibliotecário Gabriel Luz CRB-4/2222

M543m Menezes, Mariana Souza.  
Modelo de suporte ao planejamento de manutenção para sistema na indústria de petróleo / Mariana Souza Menezes. 2022.  
100 f.; figs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Recife, 2022.  
Inclui referências.

1. Engenharia de produção. 2. Sistemas complexos. 3. Análise de criticidade. 4. Condições de risco. 5. Abordagem multicritério. I. Cavalcante, Cristiano Alexandre Virgínio (Orientador). II. Título.

UFPE

658.5 CDD (22. ed.)

BCTG / 2022 - 229

MARIANA SOUZA MENEZES

**MODELO DE SUPORTE AO PLANEJAMENTO DE MANUTENÇÃO PARA  
SISTEMA NA INDUSTRIA DE PETRÓLEO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção. Área de concentração: Gerência de produção.

Aprovada em: 21 / 02 / 2022.

**BANCA EXAMINADORA**

---

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

---

Profa. Dra. Caroline Maria de Miranda Mota (Examinadora)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. André Luís Policani Freitas (Examinador)  
Universidade Estadual do Norte Fluminense

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de mostrar minha gratidão a todas as pessoas que tornaram esta dissertação possível e uma experiência inesquecível para mim.

Primeiramente, agradeço aos meus pais por me oferecerem o chão a partir do qual eu pudesse voar. Gostaria de agradecer particularmente a minha Mãe que me ensina tanto sobre a vida, com ela aprendo a ser otimista, a ter fé e acreditar que vai dar certo. A minha família, o meu muito obrigada por serem conforto e sempre me devolverem a mim.

Aos meus colegas de mestrado que desde que iniciei este processo tive a sorte de encontrá-los. Evanielle, Liana, Maria Júlia e Maricelia obrigada por todo o suporte durante todo o primeiro ano do mestrado. A Eugenio Fischetti e Paulo Gabriel gostaria de agradecer a parceria, pelas trocas e por estarem sempre presentes. A Augusto Rodrigues e Rafael Paiva por me mostrarem os passos. E, retorno a Evanielle Barbosa para agradecê-la pela troca, pela dedicação e por todo o apoio durante esse processo. Ressalto que, apesar da loucura que é o mestrado vocês tornaram o caminhar menos árduo.

A Bianca Davi pelas palavras que insistem quando o sentido escapa, por me acompanhar os passos e me ensinar tanto sobre a vida, por tudo, tanto, sempre meu obrigada. A Mariana Santana pela escuta cheia de carinho, por me apresentar um olhar cheio de possibilidades e coragem. A Renata Nobrega pelo sorriso, pela gargalhada, pelo olhar e por todo o suporte para que eu pudesse finalizar esta dissertação. A Maria Tereza por sempre estar. Guardo cada uma de vocês como quem guarda um tesouro.

Ao grupo composto por Clarice Santana, Bianca Davi, Gustavo Davi, Lucas Aurelio, Mariana Santana e Sterphany Ohana, que são um afago para meu coração e tornam a vida mais leve. No mais, aproveito o espaço para agradecer a Joseana, Gutemberg e Gustavo pela acolhida sem tamanho.

Aos professores Cristiano Alexandre Virgínio Cavalcante e Alexandre Ramalho Alberti por se apresentarem como o meio, agradeço a oportunidade que despon em uma reflexão profunda.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer ao professor da minha graduação Hugo Miguel Lisboa o qual serei eternamente grata por acreditar em mim e mostrar que tudo é possível. E a todas as demais pessoas que direta ou

indiretamente contribuíram para que este sonho se tornasse uma realidade o meu muito obrigada.

## RESUMO

Sistemas complexos usualmente operam sob condições de risco, fator que requer uma abordagem adequada para apoiar o planejamento da manutenção, visto que, tem se tornado, cada vez mais importante o gerenciamento de risco pois garante a segurança e integridade dos ativos. Isso se deve, porque, devido ao cenário competitivo, as empresas têm buscado melhorar o desempenho agregando diretamente em sua eficiência operacional. Adicionalmente, muitas vezes a arquitetura do sistema, as condições de operação ou mesmo os padrões de trabalho podem impor algumas dificuldades para a inspeção e manutenção de seus componentes. Neste sentido, esta pesquisa tem por objetivo propor uma metodologia para apoiar o planejamento da manutenção de componentes de sistemas que operam sob condições de risco, avaliando as suas criticidades e particularidades. Sendo, portanto, uma forma de explorar as reais condições dos componentes dando uma melhor compreensão como os riscos potenciais do ativo podem afetar a operação. Para atingir o objetivo, a metodologia está envolvida em uma abordagem multicritério para apoiar a classificação do nível de criticidade em cada componente do sistema, considerando os impactos que os eventos de falha podem ter em múltiplas dimensões, sendo estas: financeira, humana, ambiental e operacional. Adicionalmente, a metodologia desenvolvida baseou-se na aplicação dos conceitos da Teoria da Utilidade e do método ELECTRE TRI, através do qual foi possível designar componentes de um sistema complexo a classes pré-estabelecidas de riscos de maneira a auxiliar na tomada de decisão a fim de que ações efetivas para a mitigação dos impactos de falha possam ser executadas. Assim, a fim de potencializar o estudo, uma aplicação numérica do modelo foi realizada, tendo como suporte, para classificação de componentes em categorias de risco, o software IRIS.

Palavras-chave: sistemas complexos; análise de criticidade; condições de risco; abordagem multicritério.

## **ABSTRACT**

Complex systems usually operate under risk conditions, a factor that requires an adequate approach to support maintenance planning, since risk management has become increasingly important as it ensures the safety and integrity of assets. This is because, due to the competitive scenario, companies have sought to improve performance by directly adding to their operational efficiency. Additionally, many times the system architecture, the operating conditions or even the work patterns can impose some difficulties for the inspection and maintenance of its components. In this sense, this research aims to propose a methodology to support the maintenance planning of system components that operate under risky conditions, evaluating their criticality and particularities. It is, therefore, a way of exploring the real conditions of the components, giving a better understanding of how the potential risks of the asset can affect the operation. To achieve the objective, the methodology is involved in a multi-criteria approach to support the classification of the level of criticality in each component of the system, considering the impacts that failure events can have in multiple dimensions, namely: financial, human, environmental and operational. Additionally, the methodology developed was based on the application of the concepts of Utility Theory and the ELECTRE TRI method, through which it was possible to assign components of a complex system to pre-established classes of risks in order to assist in decision making to those effective actions to mitigate the impacts of failure can be carried out. Thus, to enhance the study, a numerical application of the model was carried out, having the IRIS software as support for classifying components into risk categories.

**Keywords:** complex systems; criticality analysis; risk conditions; multicriteria approach.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Áreas de integração da pesquisa.....	18
Figura 2 - Representação da loteria .....	34
Figura 3 - Exemplo de Modelagem do ELECTRE TRI .....	36
Figura 4 - Estrutura do modelo multicritério .....	44
Figura 9 - Análise conjunta da perda humana.....	58
Figura 5 - Loteria $[h_0,p; h_1,1-p]$ .....	61
Figura 6 - Função utilidade unidimensional - Decisor averso ao risco.....	62
Figura 7 - Função utilidade unidimensional - Decisor neutralidade ao risco .....	63
Figura 8 - Função utilidade unidimensional - Decisor propensão ao risco .....	63
Figura 10 - Definição das categorias utilizando os perfis de referência .....	67
Figura 11 - Diagrama de fluxo sistema de alimentação .....	71
Figura 12 - Diagrama de bloco sistema de alimentação .....	72
Figura 13 - Modelo do sistema standby .....	73
Figura 14 - Flange localizada na tubulação do sistema de alimentação .....	75
Figura 15 - Ilustração do processo de um acidente.....	75
Figura 16 - Falhas associadas aos componentes do sistema de alimentação.....	76
Figura 17 - Análise do quantitativo de cada classe .....	87

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes de relatórios de acidentes analisadas neste estudo.....	74
Tabela 2 - Utilidades esperadas associadas aos perfis de referência da classe.....	78
Tabela 3 - Conjunto de componentes a serem classificados .....	79
Tabela 4 - Valores da área atingida para cada componente do sistema.....	80
Tabela 5 - Valores do downtime área atingida para cada componente do sistema ..	80
Tabela 6 - Valores da taxa de falha para cada componente do sistema.....	81
Tabela 7 - Valores da utilidade esperada para a dimensão humana .....	82
Tabela 8 - Valores da utilidade esperada para a dimensão ambiental.....	83
Tabela 9 - Valores da utilidade esperada para a dimensão financeira.....	83
Tabela 10 - Valores da utilidade esperada para a dimensão operacional.....	84
Tabela 11 - Classificação obtida para os componentes do sistema de alimentação.	86

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.1.1	<b>Objetivo geral</b> .....	16
1.1.2	<b>Objetivo específico</b> .....	16
1.2	METODOLOGIA .....	17
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>20</b>
2.1	ANÁLISE DE CRITICIDADE.....	20
<b>2.1.1</b>	<b>Métodos Aplicados na Análise de Criticidade</b> .....	<b>21</b>
2.1.1.1	Número de Prioridade de Risco (RPN).....	22
2.1.1.2	Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA) .....	22
2.1.1.3	Classificação ABC .....	23
2.1.1.4	Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) .....	24
2.2	O CONCEITO DO RISCO .....	25
<b>2.2.1</b>	<b>O risco na abordagem da teoria da decisão</b> .....	<b>28</b>
2.3	CONCEITOS INICIAIS DE DECISÃO .....	29
<b>2.3.1</b>	<b>A Teoria da Decisão</b> .....	<b>30</b>
<b>2.3.2</b>	<b>A Teoria da Utilidade</b> .....	<b>32</b>
<b>2.3.3</b>	<b>O Apoio à Decisão Multicritério</b> .....	<b>34</b>
2.4	MÉTODO ELECTRE TRI.....	35
<b>2.4.1</b>	<b>A Problemática de Classificação</b> .....	<b>36</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Procedimento de Agregação</b> .....	<b>37</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Índices de Concordância Parcial e Global</b> .....	<b>38</b>
<b>2.4.4</b>	<b>Índice de Discordância</b> .....	<b>39</b>
<b>2.4.5</b>	<b>Índice de credibilidade</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4.6</b>	<b>Índice de Corte</b> .....	<b>40</b>
<b>2.4.7</b>	<b>Procedimento de Alocação</b> .....	<b>40</b>
2.5	SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTES TRABALHO .....	41
<b>3</b>	<b>CONSTRUÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO</b> .....	<b>43</b>
3.1	A ESTRUTURA DO MODELO DE DECISÃO .....	43
3.2	DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	46

3.2.1	<b>Identificação das Dimensões das Consequências</b> .....	46
3.3	ANÁLISE DAS CONSEQUÊNCIAS.....	48
3.4	ESTIMAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DOS ..CENÁRIOS ACIDENTAIS .....	50
3.5	CÁLCULOS DAS PROBABILIDADES DAS CONSEQUÊNCIAS .....	50
3.5.1	<b>Estimação da Função Consequência Humana – <math>P(ch   \theta, wi)</math></b> .....	52
3.5.2	<b>Estimação da Função Consequência Ambiental – <math>P(ca   \theta, wi)</math></b> .....	53
3.5.3	<b>Estimação da Função Consequência Financeira <math>P(cs   \theta, wi)</math></b> .....	54
3.5.4	<b>Estimação da Função Consequência Operacional – <math>P(ce   \theta, wi)</math></b> .....	55
3.6	ANÁLISE DA PROBABILIDADE DO NÚMERO DE EVENTOS DE FALHA – $P(N_F   \theta, WI)$ .....	55
3.6.1	Análise da Distribuição Multinomial .....	56
3.7	TEORIA DA UTILIDADE.....	59
3.7.1	<b>Avaliação Intracritério</b> .....	60
3.7.2	<b>Função Utilidade</b> .....	61
3.8	CÁLCULO DA UTILIDADE ESPERADA – $E[U_k(W_i)]$ .....	64
3.9	ESPECIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS DE RISCO E DOS PERFIS QUE AS LIMITAM .....	64
3.9.1	<b>Alocação dos Componentes às Categorias de Risco</b> .....	66
3.9.2	<b>Categorização dos Componentes às Categorias de Risco</b> .....	67
4	<b>APLICAÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM SISTEMA COMPLEXO</b> .....	68
4.1	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTO OPERACIONAL.....	68
4.1.1	<b>Indústria de Petróleo e Gás</b> .....	68
4.1.1.1	Refinaria .....	70
4.1.2	<b>Caracterização do Sistema</b> .....	71
4.1.2.1	Enumeração das Falhas dos Componentes.....	73
4.2	APLICAÇÃO NUMÉRICA .....	77
4.2.1	<b>Definição das Alternativas</b> .....	78
4.2.2	<b>Utilidade Esperada</b> .....	82
4.3	APLICAÇÃO DO ELECTRE TRI.....	84
4.4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	86
5	<b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	90
5.1	CONCLUSÕES .....	90

5.2	TRABALHOS FUTUROS.....	91
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Na atualidade, o cenário competitivo gera um enorme dinamismo e entusiasmo para que as empresas de manufatura melhorem seu desempenho agregando diretamente em sua eficiência operacional. Paralelamente, tem-se uma crescente complexidade das instalações e operações de petróleo e gás, requerendo uma busca por garantir níveis mais elevados de segurança, colocando uma grande pressão sobre os engenheiros e operadores na busca por soluções inovadoras, a fim de que os cenários de perigo sejam minimizados e, a operações se tornem economicamente viáveis (KHAN et al., 2012).

Alinhado a isso, Attia & Sinha (2020) pontuam que os setores químico, petroquímico e de refinaria têm enfrentado regulamentos mais rígidos de segurança, proteção ao meio ambiente e de integridade que estão associados a desafios como a necessidade de minimizar o custo para melhorar a competitividade.

Considerando esses aspectos, o setor petrolífero se depara, também, com questões como a complexidade e a demanda por segurança e integridade dos ativos que exigem uma abordagem avançada para gerenciar a manutenção de maneira a garantir a qualidade e disponibilidade dos bens e serviços no processo, à vista de controlar rigorosamente todos os aspectos envolvidos na operação. Tsang (2002) endossa que estar tecnologicamente atualizado e administrar os impactos das operações são aspectos possivelmente considerados ao avaliar o desempenho de uma organização.

Deste modo, o processo de gerenciamento da manutenção envolve o desenvolvimento de estratégias que impactam diretamente em um melhor desempenho das operações de um sistema. Logo, a gestão da manutenção é considerada como a gestão de todos os ativos de propriedade de uma empresa, com base na maximização do retorno de investimento no ativo, garantia pela segurança, integridade do meio ambiente e das pessoas. Alinhado a isso, Dhillion (2002) afirma que, uma redução do custo operacional de cerca de 40- 60%, pode ser alcançada por meio de estratégias de manutenção eficazes.

Dentro deste contexto, a análise de criticidade é um processo que fornece uma base sistemática para decidir quais ativos devem ter prioridade dentro de um programa de gerenciamento de manutenção (MÁRQUEZ, 2007) que, se tornou uma

necessidade comercial, ao longo dos anos, para maximizar a disponibilidade durante a fase operacional dos ativos.

Portanto, a importância da análise de criticidade se justifica a partir do entendimento que ela dá sobre como os riscos potenciais do ativo podem afetar a operação. Birkner (2004) ressalta em seu estudo que existe uma forte correlação entre a disponibilidade de um ativo físico e o seu gerenciamento.

Adicionalmente, no setor industrial, o êxito passa pela gestão inteligente dos ativos, pois estes podem ser responsáveis por até 40% dos recursos financeiros de uma organização. Por isso, o controle das operações exige um nível de gestão mais aprofundado e seguro, devido à sua complexidade.

E para que esse controle atenda ao parâmetro de segurança necessário, a análise de criticidade é fundamental. A partir dela, é possível determinar os pontos críticos e reduzir as perdas decorrentes de falhas e erros no gerenciamento dos ativos.

Zammori e Gabrielli (2011) pontuam que em circunstâncias normais de operação, a criticidade de um sistema não resulta apenas de um fator, mas sim de vários fatores inter-relacionados, avaliados e analisados mediante a sua importância dentro do processo.

À vista disso, Bertolini *et al.* (2009) define que os equipamentos críticos podem ser identificados com base em seu nível de risco aceitável, inicialmente selecionado. Assim, a manutenção do equipamento é priorizada com base no risco, diminuindo a probabilidade de falha e tornando a manutenção mais efetiva.

A fim de realizar a priorização de equipamentos para manutenção, diferentes métodos de análise de risco têm sido desenvolvidos e aplicados, podendo ser classificados como: qualitativo, quantitativo ou semiquantitativo (KHAN; HASHEMI, 2017). Nesse sentido, a literatura apresenta diversas metodologias para utilização em análise de criticidade, como Avaliação de Risco, Análise Crítica dos Modos de Falha e Efeitos - FMECA (TOMADIS & PISTIKOPOULOS, 2004). Para abordagens quantitativas, considerando taxa de falha, taxa de efeitos das falhas e índices de manutenção (MIL-1629, 1980; IEC 60812, 2006) e abordagens qualitativas, observando critérios operacionais específicos, baseados na experiência dos avaliadores (MOUBRAY, 1997; SIQUEIRA, 2009).

A metodologia mais difundida para realizar a priorização da manutenção em ativos de maneira a categorizá-los em vários grupos de risco é baseada no uso do Efeito do Modo de Falha e Análise de Criticidade - FMCEA (SACHDEVA *et al.*, 2009).

No entanto, a maioria das técnicas atuais para a análise de criticidade de ativos usa um método de pontuação ponderada definido como variação do método RPN (*Risk Priority Number*) fazendo com que fatores determinantes para a criticidade não sejam considerados.

Logo, apesar dessas técnicas serem populares, alguns autores pontuam que a maioria delas são deficientes em análises de incerteza e sensibilidade (ARUNRAJ & MAITI, 2007). Esse fator pode levar a uma restrição na obtenção de resultados adequados e as decisões podem ser tomadas de forma ineficaz podendo gerar esforços de manutenção desnecessários.

Portanto, diante da necessidade de decisões efetivas para o planejamento da manutenção, especialmente na indústria do petróleo, é imprescindível que a análise de risco e criticidade de ativos seja conduzida de maneira apropriada, possibilitando a devida identificação de fontes de risco relevantes, para que possam ser abordadas no planejamento da manutenção (YAZDI *et al.*, 2019).

Carpitella *et al.* (2018) pontua que a manutenção é reconhecida como uma das principais áreas relacionada a gestão de ativos que pode ser efetivamente realizada e controlada para melhorar o desempenho de sistemas complexos atrelado a disponibilidade, confiabilidade, nível de produção, custos, segurança, entre outros, em vários ambientes operacionais.

Considerando todos esses aspectos, a otimização da disponibilidade de produção nos negócios de petróleo e gás, requer uma abordagem integrada da confiabilidade, disponibilidade e da manutenibilidade dos sistemas e seus respectivos componentes. Dentro dessa perspectiva, Vincke (1992) afirma que os Métodos Multicritérios oferecem uma importante ferramenta de tomada de decisão, ao conceder aptidão para o decisor solucionar problemas que envolvem vários pontos de vista conflitantes e diferentes critérios a serem ponderados.

Posto isso, os métodos de Apoio a Decisão Multicritério possibilitam um enfoque subjetivo, integrando na solução do problema para todas as características necessárias, tanto quantitativas quanto qualitativas, através da combinação de fatores que melhor descrevem o sistema técnico em análise, de modo a otimizar as estratégias de manutenção. Costa *et al.* (2012) destacam que a metodologia multicritério visa auxiliar no processo de decisão, classificando as ações potenciais de maneira a incorporar multicritérios.

Assim, o presente trabalho vai ao encontro dessa premissa, e propõe um modelo para avaliação multicritério da criticidade de componentes de um sistema que opera em condições de risco. Particularmente, observa-se contribuições significativas de modo a servir de apoio para o planejamento e execução das ações de manutenção tendo como base uma análise mais ampla dos riscos, buscando agregar aos sistemas petrolíferos o enfoque multicritério para avaliação da criticidade de seus componentes, a fim de que ações efetivas para a mitigação dos impactos possam ser elaboradas e executadas.

## 1.1 OBJETIVOS

Este tópico apresenta o objetivo geral desta pesquisa, assim como os objetivos específicos, necessários para o alcance do objetivo geral.

### 1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia, a partir da análise multicritério, para classificação de risco de componentes em sistemas complexos, a fim de dar apoio ao planejamento de medidas mitigadoras para sistemas que operam em condição de risco.

### 1.1.2 Objetivo específico

Para atingir o propósito principal, será necessário desenvolver os seguintes objetivos específicos:

- Investigar os aspectos relevantes sobre as metodologias para determinação de criticidade em sistemas industriais;
- Elaborar uma contextualização do problema, apresentando as características do sistema técnico que servirá de base para a aplicação da metodologia;
- Estruturar o modelo de decisão multicritério para análise de criticidade em sistemas complexos tendo como base a literatura pesquisada;

- Desenvolver um *framework* a fim de consolidar a metodologia para a designação da criticidade de componentes em um sistema industrial complexo tendo como base a análise em múltiplas dimensões de risco;
- Promover maior compreensão sobre a metodologia a partir da aplicação numérica do modelo proposto.

## 1.2 METODOLOGIA

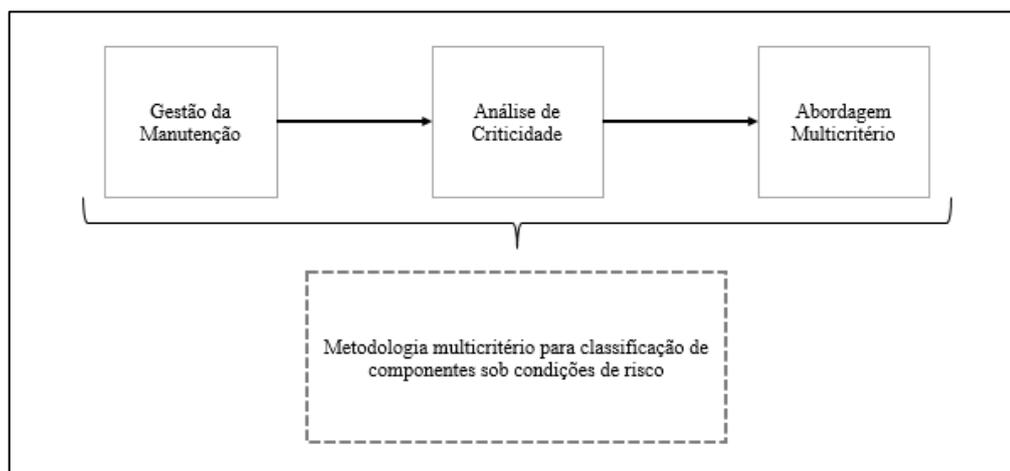
A pesquisa pode ser definida como um procedimento racional e sistemático que busca trazer respostas a problemas propostos (GIL, 2008). A pesquisa pode ser classificada de acordo com diferentes critérios, a depender do enfoque que será dado a ela: quanto a finalidade, quanto ao objetivo ou quanto a natureza.

A metodologia desta pesquisa consiste nos passos propostos por Almeida *et al.* (2015) no que tange a construção de um modelo multicritério de suporte a decisão para analisar riscos agregando conceitos da Teoria da Utilidade. Dentro deste contexto, este trabalho busca classificar componentes de um sistema industrial complexo, diferente da metodologia apresentada por Almeida *et al.* (2015) que se propõe a classificar trechos de gasoduto tomando como critérios as dimensões associadas aos riscos de acidentes decorrentes do vazamento de gás natural.

Particularmente, no que diz respeito a abordagem de análise de criticidade foi realizado uma revisão bibliográfica, onde foram vistos os conceitos relevantes acerca da análise de criticidade, bem como sobre a análise de risco e o apoio multicritério à decisão. Desta forma, foi possível identificar métodos que melhor agreguem no desenvolvimento de uma avaliação de criticidade de componentes industriais.

Desta forma, o modelo proposto é resultado da interface entre a análise de criticidade e metodologia multicritério de apoio à decisão (relacionada a Métodos de Sobreclassificação), mais especificamente o método ELECTRE TRI, a fim de apoiar a gestão da manutenção.

Figura 1 - Áreas de interface da pesquisa



Fonte: a autora, 2022

A metodologia deste estudo permite a ponderação entre a avaliação de risco e a análise de criticidade de sistemas complexos. Neste sentido, tem-se como base o RBM (*Risk Based Maintenance*) para definição dos critérios que serão avaliados no estudo. A próxima etapa diz respeito à determinação da probabilidade de ocorrer a perda em cada dimensão devido a  $n$  eventos de falha e as consequências para cada componente do sistema técnico. Permitindo que a utilidade esperada seja calculada para cada componente nas diferentes dimensões (*i.e.*, critérios). De posse da utilidade esperada, o método ELECTRE TRI pode ser aplicado para classificar os componentes de acordo com sua criticidade nas múltiplas dimensões.

À vista do exposto, apesar dessa pesquisa está voltada para a aplicação do método em um sistema de alimentação de uma refinaria, a metodologia apresentada pode ser adaptada a outros sistemas complexos. Assim, a fim de potencializar o estudo, uma aplicação numérica do modelo foi realizada, tendo como suporte para resolver o método ELECTRE TRI o *software* de apoio a decisão IRIS.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Com a finalidade de proporcionar melhor compreensão da estrutura deste trabalho, a proposição de cada capítulo é apresentada, de forma resumida:

- O Capítulo 1 tem o intuito de introduzir o tema do trabalho, expor seus objetivos e justificar o desenvolvimento.

- No Capítulo 2 são apresentados os conceitos que norteiam essa pesquisa, além de exemplificar estudos que embasam essa pesquisa. Serão abordados conceitos acerca da Análise de Criticidade, Análise de Risco, Teoria da Decisão, Teoria da Utilidade, Apoio Multicritério da Decisão visando o enfoque no método ELECTRE TRI.

- Por sua vez, o Capítulo 3 contempla o modelo de decisão integrando a análise multicritério. Para a compreensão do modelo em questão, são apresentadas as hipóteses assumidas, destrinchando cada uma das etapas da metodologia de forma sistemática, desenvolvida para avaliação da criticidade em um sistema complexo.

- O Capítulo 4 apresenta a descrição e o contexto operacional do sistema escolhido para aplicação do método, apresentando as principais informações acerca do sistema base utilizado neste estudo, cujos riscos são objeto de estudo desta pesquisa. Adicionalmente, o capítulo expõe a aplicação numérica do modelo de decisão, o qual ao final é apresentado as classificações dos componentes do sistema base realizada com o auxílio do ELECTRE TRI. Este capítulo tem por objetivo ilustrar a aplicação do modelo.

- E, finalmente, o Capítulo 5 apresenta as conclusões e considerações acerca da metodologia de avaliação da criticidade que, neste estudo teve como escopo a classificação dos componentes em um sistema de alimentação da Unidade de Craqueamento de uma Refinaria Petroquímica. Adicionalmente, o capítulo apresenta uma lista de sugestões para futuros trabalhos no tema abordado.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O escopo deste capítulo é apresentar as bases teóricas que fundamentam esta dissertação. Apresenta-se os conceitos relacionados a análise de criticidade, avaliação do risco, teoria da decisão, apoio multicritério à decisão e método ELECTRE TRI. Em seguida, expõe-se o contexto que motivou o desenvolvimento deste trabalho. O objetivo do presente capítulo é, tão somente, o de fornecer subsídios para que se possa resolver, em bases científicas, o problema proposto.

### 2.1 ANÁLISE DE CRITICIDADE

A análise de criticidade foi desenvolvida pela primeira vez como uma metodologia formal na década de 1960 pela indústria aeroespacial como requisito para a confiabilidade e segurança nas aeronaves (CHANG; CHENG, 2010).

Moss e Woodhouse (1999) afirmam que definir “criticidade” é complexo porque pode ter diferentes interpretações, dependendo do objetivo e contexto no qual ela é analisada. Wessels e Sautter (2009) reforçam que análise de criticidade fornece meios para quantificar os efeitos da ausência da função de um componente, equipamento ou sistema em relação a toda a produção, sendo conduzida de forma qualitativa ou quantitativa.

Alinhado a isso, Baran (2015) afirma que, “as ações de planejamento e gestão da manutenção em ambientes industriais estão diretamente relacionadas com a criticidade de suas peças e equipamentos”. Da mesma forma, Kardec *et al.* (2014) defendem que a definição de criticidade dos ativos “serve de guia para ações de planejamento e programação pelo PCM – Planejamento e Controle da Manutenção, classificação de sobressalentes pela área de suprimentos, definição das políticas de manutenção dos ativos pela execução, análises e estudos pela engenharia de manutenção, dentre outros”.

Nessa perspectiva, os sistemas industriais são planejados, operados e mantidos com o intuito de produzir a fim de satisfazer as necessidades dos clientes, mediante um elevado nível de qualidade no produto final, seja ele um produto ou serviço. Para atingir esta qualidade os sistemas industriais de produção, no decorrer do tempo de sua operação, algumas falhas podem ocorrer, o que irá comprometer o desempenho. Logo, se torna necessária a adoção de uma política correta de

manutenção para restaurar o desempenho do sistema a um nível desejado (MOHIDEEN *et al.*, 2011; WANG e PHAM, 2011).

À vista disso, como pontuado por Tomaidis & Pistikopoulos (2004), a análise de criticidade é bastante utilizada na priorização de sistemas e equipamentos críticos, considerando interações entre processos, modelos de confiabilidade, variações dos parâmetros e características operacionais de um processo. Ribeiro (2010) pontua que “a criticidade informa o quanto um equipamento pode ser decisivo dentro do contexto operacional”.

Diversos métodos foram desenvolvidos de maneira a atrelar a análise de criticidade a avaliação do risco (Kurd & Kelly 2007; Hsiao & Lu 2008; Karim, Smith, & Halgamuge 2008; Majdara & Nematollahi 2008; Tamura & Yamada 2009).

Dessa forma, através da análise de criticidade é possível realizar uma abordagem sistemática de todas as operações em uma instalação ou área, de modo a avaliar o nível de criticidade de componentes em um sistema industrial, tanto em condições normais quanto em condições de falha potencial. Isso se aplica a todos os estágios do ciclo de vida de uma instalação em um sistema industrial. Alinhado a isso, e diante da necessidade de uma avaliação de criticidade mais efetiva, várias técnicas podem ser empregadas para identificação do sistema mais crítico, que podem determinar quais aspectos das operações requerem medidas preventivas de segurança.

### **2.1.1 Métodos Aplicados na Análise de Criticidade**

Diferentes métodos foram formulados para identificar os equipamentos críticos de um sistema, alguns focados exclusivamente no efeito da falha no processo (BAHRAMI & PRICE, 2000), outros baseados no risco envolvido, como HAZOP (*Hazard and Operability Study*) (CASAL, 2001) ou na segurança do equipamento (CEPIN, 2002). Em outros casos, o objetivo é classificar as atividades de manutenção a serem realizadas, ao invés de categorizar os equipamentos, por exemplo, o FMEA (Análise dos modos de falhas e efeitos) que por meio do Número de Prioridade de Risco (RPN) serve de suporte para a determinação da atividade de manutenção a ser priorizada (STAMATIX, 2003).

### 2.1.1.1 Número de Prioridade de Risco (RPN)

O RPN é uma função de três parâmetros de maneira a saber a gravidade do efeito da falha, a probabilidade de ocorrência e a facilidade de detecção para cada modo de falha. Nesse sentido, o RPN é obtido a partir da multiplicação desses três números, de acordo com a Equação (01) abaixo:

$$RPN = S \times P \times D \dots\dots\dots(1)$$

Onde S é a gravidade do efeito da falha, P é a probabilidade de falha e D é a facilidade de detecção.

A abordagem RPN é uma alternativa à matriz de risco, encontrada no FMEA. Dessa forma, o RPN ajudará na indicação dos valores de limiar para determinar o equipamento de maior atenção. Em outras palavras, um modo de falha com um valor alto de RPN deve receber a prioridade na análise de maneira a servir de suporte para a tomada de decisões mais efetivas ao realizar o planejamento da manutenção. Siqueira (2014) acrescenta que a facilidade ou dificuldade de detecção pode ser estimada por uma escala de níveis de detectabilidade, escolhida e padronizada pela organização.

Apesar de sua aplicação frequente em ambientes industriais, o RPN tem sido amplamente questionado por vários autores (GILCHRIST 1996, TENG & HO 1996, BOLWES 2003, BRAGLIA *et al* 2003). Isso se deve porque mesmo que o método utilize tabelas de conversão para os parâmetros, é difícil dar uma avaliação precisa para quantidades intangíveis. Outro ponto é que a abordagem negligência o custo de produção e qualidade. Além do mais, o uso da multiplicação é questionável porque é difícil diferenciar a importância de cada critério avaliado.

### 2.1.1.2 Análise dos Modos de Falha e Efeitos (FMEA)

Segundo Barros (2006), a ferramenta FMEA surgiu por volta de 1949 e destinava-se às análises de falhas em sistemas e equipamentos do exército americano, onde era avaliada a sua eficiência baseando-se no impacto sobre uma missão ou no sucesso de defesa pessoal de cada soldado.

Scheu *et al.* (2019) comentam que a FMEA é um processo lógico de avaliação de risco qualitativo voltado para avaliar modos de falha (FMs) de um processo, procedimento ou sistema e suas causas e efeitos.

A análise dos modos de falha e efeitos (FMEA) é uma abordagem estruturada de baixo para cima que se inicia com modos de falha potenciais já conhecido em um nível e investiga o efeito sobre o próximo nível do processo (WANG *et al.*, 1996).

Portanto, a ferramenta FMEA pode ser entendida como uma metodologia sistemática que permite identificar potenciais falhas de um sistema, projeto e/ou processo, com o objetivo de eliminar ou minimizar os riscos associados, antes que tais falhas aconteçam. O objetivo é eliminar os modos de falha ou reduzir os riscos associados. A metodologia do FMEA está voltada para a realização de *brainstorming* de maneira a identificar os potenciais modos de falha e seus efeitos em um processo. Geiger & Kotte (2008) ressaltam que ao final da metodologia é possível iniciar um planejamento de manutenção preventiva ou corretiva mais direcionado.

Gupta & Mishra (2017) pontuam que o FMEA e a análise de criticidade ajudam diretamente na manutenção pois fornece os modos de falha de maneira a prevenir causas de falhas críticas. Adicionalmente, (MIRI LAVASANI *et al.*, 2011; SHAHRIAR, 2012; MANDAL & MAITI, 2014; XU *et al.*, 2002; CELIK, 2010) aplicaram o método *Fuzzy* atrelado ao método FMEA para lidar com as incertezas e aumentar a efetividade das informações de modo a ter uma confiabilidade nos diferentes modos de falha de um sistema.

Mais recentemente, Kang *et al.* (2017) aplicou o método FMEA para conduzir uma análise de confiabilidade de turbinas eólicas *offshore* flutuantes (FOWT). Entretanto, apesar de diversos estudos voltados para o modelo, a aplicação do FMEA possui limitações e dificuldades: a necessidade de equipes multidisciplinares faz com que a qualidade dos resultados seja condicionada ao trabalho em equipe, além do mais, a subjetividade das notas atribuídas à severidade, ocorrência e detecção pode causar distorções em torno da definição de prioridades.

### 2.1.1.3 Classificação ABC

A classificação ABC, também conhecida como curva ABC, é baseada no teorema do economista Vilfredo Pareto e, tem por objetivo classificar as informações de maneira a separar os itens de maior importância ou impacto. Desenvolvido pela

JIPM (*Japan Institute of Plant Maintenance*) em 1995 o método é recomendado para ser utilizado como ferramenta para avaliação da criticidade de uma máquina ou sistema dentro de um processo industrial.

Assim, a metodologia é construída com base em cinco fatores de avaliação em três níveis diferentes (segurança, confiabilidade, qualidade, frequência e custo). Servindo de suporte para classificar o equipamento nas seguintes categorias: A (criticidade máxima), B (criticidade média) ou C (criticidade baixa) (RAMLI & ARFFIN, 2012).

De acordo com Helmann (2008) o método de Classificação ABC, por basear-se em perguntas e respostas possui “fácil e rápida aplicação, sendo amplamente utilizada pelos gestores de manutenção”. Em contrapartida, a aplicação dos critérios pode ser trabalhosa e cansativa dependendo da complexidade e volume dos itens do sistema.

Além do mais, o método se apresenta como uma simplificação para realizar a classificação, fazendo com que alguns fatores considerados críticos sejam omitidos durante o processo de análise.

#### 2.1.1.4 Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM)

De acordo com Moubray (1997), a primeira indústria a confrontar sistematicamente os desafios associados a tomada de decisão relacionada a manutenção foi o da aviação comercial. Isso resultou no desenvolvimento de processos decisórios conhecidos como MSG-3 (*Maintenance Steering Group – 3*) na aviação e RCM (*Reliability centered maintenance*) nos outros setores.

Vatn, Hokstad & Bodsberg (1996) afirmam que RCM é um método de análise global para otimização da manutenção. Sendo utilizado, principalmente, para minimizar os custos de manutenção preventiva (CROCKER & KUMAR, 2000), realizando uma análise crítica levando em consideração o potencial de perdas de vidas caso venha a ocorrer uma falha no sistema.

Daniel Sheu & Lin (2006) acrescentam que o método tem por objetivo identificar o equipamento que possa ter o maior efeito em uma operação uma vez que a falha venha a ocorrer. David *et al.* (2004) desenvolveu uma metodologia para auxiliar o planejamento da manutenção a partir de uma gestão integrado a teoria dos conjuntos

difusos com a rede neural B, realizando uma avaliação de criticidade de equipamentos críticos petroquímicos tendo por base o RCM.

Artigo *et al.* (2018) publicaram um estudo relevante na área de confiabilidade. Foi utilizado estatísticas de confiabilidade e registros de controle de manutenção para atribuir níveis de criticidade para sistemas de turbinas eólicas a fim de priorizar cenário para manutenção.

No método RCM, a avaliação de criticidade é tratada como uma metodologia qualitativa baseada na experiência do decisor, o que pode resultar em uma avaliação que tem uma base mais qualitativa das informações o que demanda bastante tempo para se chegar a um resultado.

## 2.2 O CONCEITO DO RISCO

A Sociedade Americana de Engenheiros Mecânicos (ASME) reconheceu na década de 1960 a necessidade de estudar o risco de forma multidisciplinar. Os resultados desta pesquisa apareceram por volta dos anos 1980 a partir da determinação de métodos baseados na avaliação do risco para desenvolvimento de diretrizes de inspeções e diversas aplicações nos setores nucleares e industriais (KRISHNASAMY *et al.*, 2005).

Assim sendo, o risco está associado à incerteza da ocorrência de um evento e às suas consequências relacionadas. Portanto, o conceito do risco relacionado a um evento é definido como o produto da probabilidade e da consequência do evento. Portanto, segundo Brown & Le May (2000), a análise do risco é conhecida como uma medida importante para a segurança do sistema e, sua identificação, de acordo com a ABNT (2009) é o processo de busca, reconhecimento e descrição dos riscos tendo por base o contexto estabelecido, e apoiando-se na comunicação e consulta com as partes interessadas internas e externas.

Neste direcionamento, a avaliação do risco operacional envolve a identificação de potenciais ameaças, de maneira a estimar suas probabilidades (número de eventos/intervalo de tempo) e as consequências (impacto/evento) (ARENDDT, 1990). A Equação (02) apresenta essa definição.

$$Risco = f(p_i, c_i) \quad (2)$$

Onde:

$p_i$  – Probabilidade da ocorrência do evento  $i$

$c_i$  – Consequência da ocorrência do evento  $i$

Segundo Sánchez (2005), o termo “ $c_i$ ” representa as perdas relacionadas com a ocorrência das falhas e o termo “ $p_i$ ” à estimativa da probabilidade de o sistema cair em determinado estado de falhas. Desta forma, a avaliação do risco irá abranger quatro atividades de gerenciamento: planejamento, análise, controle, monitoramento e comunicação.

Nesse sentido, o conceito do risco se apresenta de forma bastante plural na literatura, a *Society for Risk Analysis* (SRA) define o risco como o potencial de realização de consequências adversas inesperadas à vida humana, à saúde, a propriedades ou ao meio ambiente, sendo a estimativa desse risco geralmente baseada no valor esperado da consequência, obtido pela integração da distribuição de probabilidade de um evento vezes os valores das consequências deste evento, dado que ele ocorreu (SRA, 2006).

Na avaliação de riscos industriais, Luria & Aspinall (2003) conceituam risco como a probabilidade de um efeito específico ocorrer dentro de um período específico e sob circunstâncias determinadas. Adicionalmente, esses autores afirmam que o risco pode ser sumarizado como uma função  $R = (s_i; p_i; x_i)$ , dependente de três tipos de variáveis: cenário  $s_i$ , probabilidade  $p_i$  de ocorrência do cenário, e medidas  $x_i$  das consequências do cenário.

Além disso, em contextos que envolvem a segurança humana ou ambientais, os limites de riscos aceitáveis são definidos por regulamentação de modo a demonstrar que os perigos, com potencial causa de incidentes, possam ser identificados, avaliados e, medidas para reduzi-los possam ser empregadas.

Para se ter um detalhamento melhor do risco, a análise quantitativa é utilizada por meio do uso de base de dados e, quando não se tem dados disponíveis, devem-se utilizar cálculos, simulações ou outro tipo de técnica reconhecida baseada no conhecimento dos especialistas ou na literatura.

A difusão ampla dos métodos de gestão de risco deveu-se em grande parte à necessidade das empresas de operar sistemas complexos livres de acidentes e com excelência operacional. Acidentes causados por falhas nas instalações podem trazer sérias consequências à integridade dos operadores do sistema (inclusive, causando

mortes), danos ao meio ambiente, às próprias instalações, assim como, à própria imagem (Tixier *et al.*, 2002; Aven e Korte, 2003).

Dziubinsk *et al.* (2006) afirmam que para o desenvolvimento da análise de risco e para se estimar o risco dos acidentes, métodos qualitativos, semiquantitativos e quantitativos podem ser utilizados. Métodos semiquantitativos são aplicados para identificação do perigo e seleção de eventos de falha. Ferramentas como HAZOP e *What-If*, utilizadas no processo para prover resultados na forma de categorias relevantes de risco, podem identificar níveis de risco. Métodos qualitativos são primariamente utilizados para verificar se o nível de segurança satisfaz os princípios contidos em regulamentos e padrões legais.

A realização de uma avaliação probabilística de riscos pode ser caracterizada por cinco etapas principais (MODARRES *et al.*, 1999; FABER & STEWART, 2003; DZIUBNSKI *et al.*, 2006):

1. Identificação dos eventos ou cenários de perigo;
2. Estimação das probabilidades ou frequências dos eventos ou cenários;
3. Estimação das consequências desses eventos;
4. Estimação dos riscos;
5. Classificação dos riscos.

Vesley *et al.* (1994) desenvolveu uma abordagem para a avaliação probabilística do risco (PRA) de maneira a aplicar como uma ferramenta para a priorização das atividades de manutenção. Para isso, este estudo foca nas medidas de importância de acordo com a PRA que pode vir a ser útil para priorização das atividades de manutenção. Assim, medidas de importância específicas são identificadas, as quais podem ser usadas para identificar os principais riscos associados aos equipamentos. As medidas de importância elencadas pelos autores são: Importância do equipamento mediante seu risco e Impacto do risco se a manutenção não fosse realizada de forma efetiva.

Por sua vez, Fujiyama *et al.* (2004) buscou identificar os equipamentos com maiores riscos através da estimação do risco agregado em função da soma da função de risco de todos os eventos que levam o componente à falha. Assim, foi utilizado o conceito do RBM (*Risk-Based Maintenance*) para avaliar os dados de inspeção e falha de maneira a determinar os principais modos de falha dos componentes do sistema de turbinas a vapor. Desta forma, o plano de manutenção ideal pode ser determinado

pois é possível avaliar a condição total dos componentes do sistema através das funções de risco.

Giardina e Morale (2015) desenvolveram uma avaliação de risco para determinar os possíveis eventos acidentais em um sistema de regaseificação do gás natural liquefeito (GNL). A partir da avaliação foi possível identificar as principais fontes de erros humanos, fatores casuais em falhas e falhas duplas ou comuns, realizando, assim, uma correlação da causa-consequência de perigos durante as várias etapas do processo.

Mediante o exposto, devido à incerteza associada aos seus parâmetros, o gerenciamento do risco é uma atividade crítica para os processos e instalações, principalmente para sistemas que contêm uma enorme quantidade de produtos inflamáveis e perigosos. Logo, a natureza das consequências significantes de acidentes destaca a importância do desenvolvimento apropriado e efetivo de uma técnica efetiva para o planejamento da manutenção baseado no risco para este tipo de sistemas.

### **2.2.1 O risco na abordagem da teoria da decisão**

A ideia da avaliação de risco aplicada para ajudar na tomada de decisão de maneira a reduzir a incerteza é tão antiga quanto o próprio pensamento probabilístico. O conceito foi formalizado por Ron A. Howard, um professor de ciência da decisão na Stanford University (Califórnia, EUA), em seu artigo publicado em 1963, *Decision Analysis: Applied Decision Theory*. A partir desta publicação foi formalizado e definido os componentes de uma decisão, todos os quais pode ser usado para enfocar atividades de avaliação de risco.

Apesar das várias definições e abordagens para o risco, todas permeiam a concepção de envolvê-lo à impactos negativos (perdas) cujos valores prevalece a incerteza associada à ocorrência dos eventos geradores destes impactos. Este conceito foi definido matematicamente pela Teoria da Decisão (CAMPELLO DE SOUZA, 2002) como uma função que corresponde ao valor esperado da perda quando se segue um curso de ação e a natureza assume um estado  $\theta$ , de forma a contribuir para a tomada de decisão quanto às ações para redução dos riscos tornando as operações industriais mais seguras.

Neste sentido, a tomada de decisão sob o risco trata situações em que vários estados de natureza podem ocorrer (MARGUERON E CARPIO, 2005). Um dos métodos populares mais conhecidos para a tomada de decisão sob o risco chama-se valor monetário mais alto (ou simplesmente o valor esperado).

Markowski & Mannan (2008) pontuam em seu estudo que os riscos do processo são determinados com base em uma ou mais revisões multifuncionais (por exemplo, análise de risco de processo, auditorias ou investigação de incidentes), podendo ser classificados e caracterizados pelo mecanismo de matriz de risco. Neste sentido, a avaliação de risco atrelado a teoria da decisão auxilia em toda a gestão de segurança de um processo.

Dado o rigor matemático da definição de risco fornecido pela Teoria da Decisão e a base axiomática da Teoria da Utilidade sobre a qual a mesma está estruturada para retratar as preferências dos agentes de decisão e seu comportamento em relação ao risco, permitindo uma análise de medidas para mitigar os mesmos, caso suas consequências estejam acima do tolerável. Logo, essa será a definição deste conceito adotada na construção desta dissertação.

### 2.3 CONCEITOS INICIAIS DE DECISÃO

A decisão faz parte do cotidiano, pois a todo momento é necessário fazer escolhas e estar diante de alternativas.

Para Campello de Souza (2002) uma decisão boa é proveniente da assertiva daquilo que se deseja, se conhece ou que se pode realizar. Neste sentido, Gomes *et al.* (2006) definem que o processo decisório se trata de um conjunto de alternativas possíveis para sua composição e tem associadas em sua forma, ganhos e perdas.

Diante dessa perspectiva, uma abordagem quantitativa do processo de tomada de decisão é o objeto de estudos da chamada teoria da decisão. Tal método de abordagem se faz necessário para que se possa obter soluções mais precisas e reproduzíveis, possibilitando, desse modo, a sistematização do processo decisório, tornando a decisão mais eficaz e coerente de maneira a antecipar os possíveis cenários de incerteza.

### 2.3.1 A teoria da decisão

A teoria da decisão estuda a lógica e as propriedades matemáticas da tomada de decisão sob incerteza. Nesse sentido, em mais de meio século de existência, a teoria da decisão tem sido desenvolvida, através de inúmeras contribuições para diversas áreas da acadêmica. Render *et al.* (2010) endossa que a teoria da decisão é uma abordagem analítica e sistemática para o estudo da tomada de decisão.

Diante dessa perspectiva, Campello de Souza (2002) pontua que a teoria da decisão auxilia na determinação do melhor procedimento decisório com base em uma lista exaustiva de possíveis hipóteses sobre os estados do mundo, de dados experimentais relativos a essas hipóteses, de um conjunto de prováveis ações adotadas e os possíveis ganhos ou perdas decorrentes da execução dessas ações em vários estados.

Portanto, para realizar a modelagem e à resolução de um problema de decisão, é necessário a compreensão dos seguintes conceitos:

- *Os estados da natureza:* é o conjunto de estados do mundo representado por  $\Theta = \{\theta\}$ , sendo o objetivo a respeito do qual o indivíduo está interessado;
- *As observações:* conjuntos de todas as observações possíveis denotado por  $\mathcal{X} = \{x\}$ , com total amplitude de possibilidades matemáticas. O uso das observações se dá porque em muitos problemas de decisão pode existir um conjunto de dados (observações) de uma variável ou de variáveis que guardem alguma relação com  $\theta$ . Estes dados são denominados observações. Porém, em muitos casos, não se pode observar diretamente o estado  $\theta$  da natureza, seja por uma impossibilidade física, técnica ou ainda econômica, seja porque  $\theta$  não tenha uma medida direta. Neste caso, pode ser possível trabalhar com as observações;
- *O espaço de ações:* tem por notação  $\mathcal{A} = \{a\}$ , com total amplitude de possibilidades matemáticas. Diz respeito ao conjunto de alternativas ou linhas de ação a seguir, pois, todo problema de decisão possui no mínimo duas possíveis ações disponíveis: escolher certa alternativa de ação ou não. Portanto, trata-se de fazer a escolha adequada de uma ação a tomar, escolha esta que poderá ser baseada em dados (observações);
- *As consequências, bens ou payoffs:* é o conjunto de consequências  $\mathcal{P} = \{p\}$ . Quando o agente de decisão adota uma ação  $a$  e a natureza se encontra em

certo estado  $\theta$ , então ocorre uma consequência. Sendo as consequências das ações sempre incertas, de forma que nunca se sabe exatamente qual o bem ou perda que irá resultarem decorrência da combinação do estado da natureza e da ação adotada, as distribuições de probabilidade sobre as consequências determinísticas é que são consideradas as consequências do problema.

Isto posto, vale ressaltar que esses conceitos são conhecidos na literatura por conjuntos e podem ser utilizados em qualquer escala de medida e forma matemática (*i.e* discreta, contínua, vetor, escala infinito e combinações). E, diretamente vinculado a esses estão os mecanismos probabilísticos que tem por intuito modelar a incerteza, que se manifesta de diversas formas nos conjuntos acima enunciados e nas relações entre seus elementos.

Assim sendo, a seguir são apresentados os mecanismos probabilísticos:

- *Função consequência*: corresponde a distribuição de probabilidade condicional  $P(p|\theta, a)$ , a probabilidade de ganhar-se o bem (consequência)  $p$ , dado que a natureza se encontra no estado  $\theta$  e o decisor adotou a ação  $a$ ;
- *Distribuição a priori sobre os estados da natureza*: utiliza-se a notação  $\pi(\theta)$  para função densidade de probabilidade e  $\Pi(\theta)$  para função de distribuição de probabilidade, o termo a priori significa “antes de se observar os valores de qualquer variável que possa dar informações sobre  $\theta$ ” (CAMPELLO DE SOUZA, 2002);
- *Função de verossimilhança*: corresponde ao canal de comunicação com a natureza, sendo representado por  $P(x|\theta)$ , que representa a probabilidade de se verificar a observação  $x$  dado que a natureza assumiu o estado  $\theta$ .

Adicionalmente, os mecanismos por serem probabilísticos podem ser estimados de forma objetivo por meio das bases de dados, ou estimados de forma subjetiva através do conhecimento de especialistas.

Em consequência, tendo como base a teoria da decisão, a função utilidade é introduzida como componente central para a tomada de decisão pois irá descrever as preferências do decisor pelas consequências associadas a cada evento de falha.

Nesta dissertação a teoria da decisão servirá como base para uma análise probabilística das consequências. De modo a utilizar dados recentes e então revisar e melhorar probabilidades estimadas em um evento.

### 2.3.2 A teoria da utilidade

Como mencionado acima, a teoria da decisão tem por construtor central a função da utilidade. Neste sentido, Souza (2005) afirma que a ideia básica da teoria da utilidade é a quantificação da desejabilidade do decisor pelos possíveis bens que poderá adquirir, associando a estes um valor que represente um critério de escolha por parte do decisor. Campelo de Souza (2002) acrescenta que o objetivo da teoria da utilidade é o desenvolvimento de um modelo matemático através do qual seja possível representar a desejabilidade do decisor de maneira a quantificar a preferência do indivíduo através de uma escala numérica.

De acordo com Keeney e Raiffa (1976), se uma utilidade apropriada é atribuída para cada consequência possível e a utilidade esperada de cada alternativa é calculada, tem-se como o melhor curso de ação a alternativa com a maior utilidade esperada. Portanto, como pontuado por Gomes *et al.* (2006) a teoria da utilidade permite uma avaliação das consequências de um problema de decisão por meio de um processo de elicitación que busca incorporar ao problema o comportamento do decisor em relação ao risco de maneira a permitir a construção de uma nova escala, denominada escala utilidade, sendo possível estabelecer para cada consequência um valor de utilidade.

Estes conceitos se desenvolveram a partir do estudo realizado por Von Neumann & Morgenstern na década de 1947, que formularam o conceito de utilidade a partir dos axiomas das preferências que impõem restrições de racionalidade às preferências do decisor. O conjunto de axiomas de preferência, que modelam o comportamento racional do decisor, assumem a seguinte notação:

- $A \sim B$ : a consequência A é indiferente à consequência B;
- $A \succ B$ : a consequência A é preferível à consequência B;
- $A \prec B$ : a consequência B é preferível à consequência A.

Assim, através desses axiomas constrói-se a função utilidade de modo a obter o comportamento do decisor alinhado a racionalidade.

Mediante essas relações Von Neumann & Morgenstern (1947) desenvolveram os axiomas de preferência:

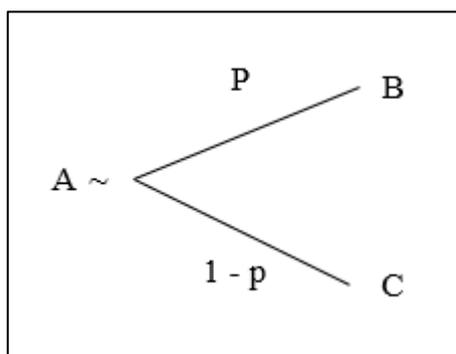
- *Axioma da ordenabilidade*: dadas as consequências A e B, pode-se dizer que  $A \succ B$  ou  $A \prec B$  ou  $A \sim B$ ;
- *Axioma da transitividade*: se  $A \succ B$  e  $B \succ C$ , então  $A \succ C$ . Por outro lado, se  $A \sim B$  e  $B \sim C$ , então  $A \sim C$ ;
- *Axioma da continuidade*: se  $A \succ B \succ C$ , então existe uma probabilidade  $p$ ,  $0 < p < 1$ , tal que  $b \sim [A, p; C, 1-p]$ ;
- *Axioma da substitutibilidade*: se  $A \sim B$ , então  $[A, p; C, 1-p] \sim [B, p; C, 1-p]$ ;
- *Axioma da redutibilidade*:  $[[A, p; B, 1-p], q; B, 1-q] \sim [A, pq; B, 1-pq]$ .

O axioma da monotocidade é de suma importância para teoria da utilidade pois, diz respeito a preferência em utilidade do aumento da consequência à medida que seu valor aumenta, assim, podemos dizer que a função utilidade é monotonicamente crescente. Por outro lado, para o caso de a preferência em utilidade diminuir com o valor da consequência, a função é monotonicamente decrescente.

No contexto desenvolvido nesta dissertação, as consequências estão relacionadas a impactos sobre os seres humanos, ambiente, financeiro e operacional, à medida que os valores destes impactos aumentam, a utilidade destas consequências diminui.

Diante dessa perspectiva, para a construção e aplicação da teoria da utilidade, costuma-se trabalhar com o conceito de loteria (Figura 2), que representa o seguinte raciocínio: o decisor está indiferente entre o valor certo  $b$  (que possui probabilidade igual a um de ocorrer) e a loteria cujo *payoff* o valor A com a probabilidade  $p$  ou o valor C com a probabilidade  $1 - p$ . Este tipo de representação será estabelecido nesta dissertação da seguinte forma:  $A \sim [B, p; C, 1-p]$ . E, de forma análoga, estabelece-se a relação de preferência estrita.

Figura 2 - Representação da loteria



Fonte: a autora, 2022

### 2.3.3 O apoio à decisão multicritério

Os métodos multicritério de apoio à decisão tem por finalidade conduzir o decisor até a solução, em diferentes espaços de consequências. Brito *et al.* (2010) pontuam que os métodos multicritério, em sistema de produção de serviços é recomendado para que seus objetivos sejam avaliados subjetivamente e depois combinados entre si, já que nesse tipo de sistema o produto é entregue ao cliente simultaneamente a sua produção.

A prática de qualquer que seja o método de análise multicritério tem a necessidade de especificar anteriormente que objetivo é pretendido pelo decisor, quando é proposto traçar um comparativo entre alternativas de decisão, utilizando múltiplos critérios (COSTA & ALMEIDA, 1990).

Segundo Munda (2008), do ponto de vista operacional, a maior força dos métodos de decisão multicritério está na habilidade de analisar sob os diversos pontos de vista, questões caracterizadas como conflitos, permitindo uma avaliação integrada do problema em questões.

Bevilacqua e Braglia (2000) afirmam que a determinação da estratégia de manutenção para cada componente em uma planta industrial é muito complexa devido às dificuldades com a aquisição de dados, o número de fatores que devem ser levado em conta (investimento requerido, problemas de segurança e ambiental, custos de falhas, confiabilidade da política, tempo médio entre falhas e tempo médio para reparo, dentre outros), suas subjetividades, o grande número de máquinas a serem consideradas dentro de uma planta e ainda, para em alguns casos, o fato de que a planta pode estar sendo implantada.

De Almeida *et al.* (2015) apontam que o processo decisório nas organizações é realizado todos os dias, mesmo sem o uso de métodos de apoio à decisão. Além disso, vale ressaltar que o desempenho dos atores do processo decisório tem impacto direto na competitividade e na sobrevivência das empresas (de Almeida *et al.*, 2013). Quando se trata de problema com múltiplos objetivos e, pelo menos, duas alternativas de escolha, tais problemas são caracterizados como problemas de decisão multicritério, do inglês *Multi-Criteria Decision Making/Aiding* (MCDM/A). Dessa forma, tem-se uma melhoria quando se aplica um modelo de decisão, que se trata de uma representação formal do problema enfrentado, uma vez que auxilia na visualização e resolução do problema de decisão.

#### 2.4 MÉTODO ELECTRE TRI

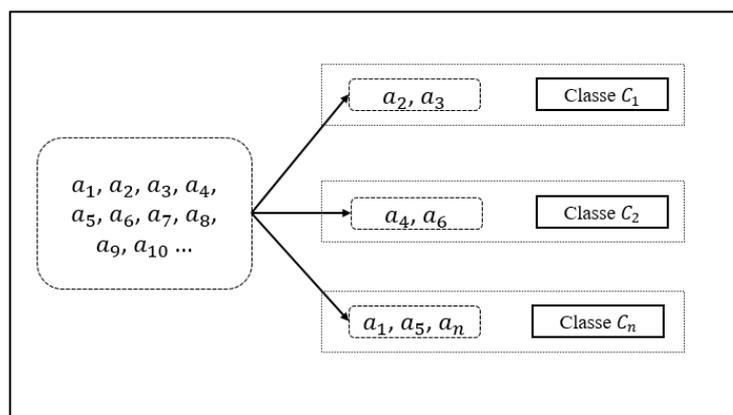
Os métodos ELECTRE (Roy, 1991) resultam da abordagem operacional de agregação de critérios através da relação de prevalência. O uso da metodologia ELECTRE TRI tem sido aplicada em diversas pesquisas envolvendo diversas problemáticas como: a seleção de sistemas de informação (COSTA & ALMEIDA, 2001), mensuração de riscos em gasodutos (BRITO, 2007), classificação de riscos industriais (COSTA *et al.*, 2007), dentre outros.

O método foi desenvolvido em 1992 pela Escola Francesa ou Europeia do AMD e, é um dos mais recentes da família ELECTRE (*Elimination et Choix Traduisant la Réalité*) de método de apoio a decisão.

De acordo com Dias *et al.* (2002) o ELECTRE TRI foi dimensionado para propor suporte ao tratamento de problemas que se deseja designar um conjunto de alternativas a um conjunto ordenado de categorias pré-estabelecidas, configuradas com base em múltiplos critérios, se enquadrando dentro das abordagens não compensatória de sobreclassificação.

Como respaldado por Roy, Mousseau, Figueira (2005), a partir das categorias pré-estabelecidas é possível alocar um conjunto de alternativas com base na comparação destas com os limites de cada categoria, conforme Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de Modelagem do ELECTRE TRI



Fonte: Adaptado Roy, Mousseau, Figueira (2005)

Nesse sentido, o método ELECTRE TRI (YU, 1992; ROY & BOUYSSOU, 1993) é um método de alocação ordinal de um conjunto de alternativas a classes pré-definidas, com base em múltiplos critérios. Face a um conjunto de classes, cada uma delimitada por duas alternativas de referência, o método aloca cada alternativa a uma classe, por comparação com cada alternativa de referência.

#### 2.4.1 A problemática de classificação

No método ELECTRE TRI, o objetivo é a realização da comparação entre as alternativas para, posteriormente, classificá-las. Por isso a utilização do termo TRI que corresponde a classificação em francês.

Logo, a problemática de classificação ( $P.\beta$ ) está voltada na definição de fronteiras superiores e inferiores destas classes e efetuar a comparação de cada alternativa a tais limites para assim definir onde cada uma será alocada. Adicionalmente, de acordo com Schärli (1996) por envolver uma problemática multicritério, tanto as categorias quanto as alternativas serão qualificadas por diversos valores.

Deste modo, levando em consideração a lógica da sobreclassificação do método, será levado em consideração a relação de hierarquia entre duas alternativas,  $a$  e  $b$ , de maneira a alocar uma alternativa  $a$ , dado um critério  $i$ , em conformidade com a sua performance  $g(a)$ .

Essa relação será representada por  $aSbk$  e, os fatores condicionantes para que ela exista é a utilização do modelo pseudo-critério. Dias *et al.* (2002) pontuam que a partir do pseudo-critério é desenvolvida uma relação binária entre uma alternativa  $a_i$  e

um perfil  $b_k$ , representada por  $a_i S b_k$ , que vai ser validada ou invalidada. Em outras palavras,  $a_i S b_k$  ( $a_i$  sobreclassifica  $b_k$ ) quando há argumentos para sustentar que  $a_i$  não é inferior a  $b_k$ .

Por meio dessa perspectiva, o limite da preferência foi desenvolvido para bloquear uma passagem brusca de um cenário de preferência estrita para a indiferença. Alinhado a isto surge umas novas alocações de preferências: a preferência fraca (Q), uma situação de dúvida entre a indiferença (I) e a preferência estrita (P). De maneira a estabelecer uma relação de prevalência entre cada alternativa  $a_i$  e um perfil  $b_k$  ( $k = 0, \dots, j$ ). Logo, se supormos que  $g(a) \geq g(b)$ , no modelo pseudo-critério têm-se:

- $a P b \Leftrightarrow g(a) - g(b) > p(g(b))$ ;
- $a Q b \Leftrightarrow q(g(b)) < g(a) - g(b) \leq p(g(b))$ ;
- $a I b \Leftrightarrow g(a) - g(b) \leq q(g(b))$ .

Assim, para realizar a classificação das alternativas às classes de acordo com as relações de preferência estabelecida, leva-se em consideração as seguintes etapas:

- Cálculo dos índices de concordância  $c_j(a_i, b_k)$  e do índice de concordância global  $C(a_i, b_k)$ ;
- Cálculo dos índices de discordância  $d_j(a_i, b_k)$  e do índice de discordância global  $D(a_i, b_k)$ ;
- Cálculo do PAMC (procedimento de agregação multicritério) com base no índice de credibilidade  $\sigma(a_i, b_k)$ ;
- Estabelecimento da relação de prevalência através do limiar de corte ( $\lambda$ ).

#### 2.4.2 Procedimento de agregação

Para realizar a comparação entre as alternativas potenciais  $a_i$  e os perfis de referência  $b_k$ . Realiza-se o procedimento de agregação, considerando o seguinte parâmetro:

- $\Delta_j =$  vantagem da alternativa  $a_i$  em relação a um perfil  $b_k$  em um dado critério  $g_j$

$$\Delta_j = \begin{cases} g_j(a_i) - g_j(b_k), & \text{Se o critério } g_j \text{ for para maximização;} \\ g_j(b_k) - g_j(a_i), & \text{Se o critério } g_j \text{ for para minimização.} \end{cases} \dots\dots\dots(3)$$

### 2.4.3 Índices de concordância parcial e global

Para cada critério, o índice de concordância indica quanto o critério está de acordo com a hipótese  $a_i S b_k$ , realizando o cálculo a seguir (DIAS, 2002):

$$c_j(a_i, b_k) = \begin{cases} 1 & \text{Se } \Delta_i \geq -q_j \\ 0 & \text{Se } \Delta_i \geq -p_j \\ [p_j + \Delta_j] / [p_j + q_j] & \text{Caso Contrário.} \end{cases} \dots\dots\dots(4)$$

Por outro lado, Mousseau & Dias (2004) propõem a seguinte alternativa para o cálculo do índice de concordância:

$$c_j(a_i, b_k) = \frac{p_j - \min [g_j(b_k) - g_j(a_i), p_j]}{p_j - \min [g_j(b_k) - g_j(a_i), q_j]} \dots\dots\dots(5)$$

Deste modo, um procedimento análogo deve ser utilizado para o cálculo do índice  $c_j(b_k, a_i)$ . Nas expressões elencadas,  $q_j$  e  $p_j$  correspondem a limiares de indiferença e preferência, respectivamente, e podem ser definidos não apenas para cada critério, mas cada critério e perfil ( $q_j(b_k)$  e  $p_j(b_k)$ ). Mousseau *et al.* (2000), pontuam que esses perfis constituem a informação preferencial intracritério, e servem para lidar com a natureza imprecisa das avaliações  $g_j(a_i)$ .  $q_j$  especifica a maior desvantagem de  $a_i$  em relação a  $b_k$  diante da qual o decisor ainda é indiferente entre  $a_i$  e  $b_k$ . Por sua vez,  $p_j$  constitui a menor desvantagem de  $a_i$  em relação a  $b_k$  a partir da qual o decisor passa a preferir  $b_k$  a segundo critério  $g_j$ .

Uma vez calculados os índices de concordância para cada critério  $g_j$ , os mesmos são então agregados em um índice de concordância global  $C(a_i, b_k)$ , considerando os coeficientes de importância  $w_j$  de cada critério:

$$C(a_i, b_k) = \frac{\sum_{j=1}^n w_j c_j(a_i, b_k)}{\sum_{j=1}^n w_j} \dots\dots\dots(6)$$

Na expressão acima, um vetor peso  $W = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$  é utilizado para agregar os índices de concordância em cada critério em um índice global. Portanto, cada critério  $g_j$  possui um peso  $w_j \geq 0$  relacionado ao grau de importância do critério, representando o “poder de veto” deste último a respeito da ratificação de  $a_i S b_k$ . Esses pesos não correspondem, portanto a taxas de compensação ou de *trade-offs*, características dos métodos compensatórios.

#### 2.4.4 Índice de discordância

Por sua vez, semelhante ao cálculo dos índices de concordância parciais e globais, obtém-se para cada critério  $g_j$  um índice de discordância, que indica quanto o critério discorda da hipótese  $a_i S b_k$ , calculado por meio da Expressão (07).

$$d_j(a_i, b_k) = \begin{cases} 0 & \text{Se } -\Delta_j \leq p_j \\ 1 & \text{Se } -\Delta_j > -v_j \\ [-\Delta_j - p_j] / [v_j + p_j] & \text{Caso Contrário.} \end{cases} \quad (7)$$

O valor da discordância é nulo se a vantagem  $\Delta_j$ , for positiva ou se a desvantagem  $(-\Delta_j)$  for menor que o limiar de preferência  $p_j$ . Ou seja, a discordância será zero (ausência de veto) quando  $a_i$  é melhor que  $b_k$  ou é pior mais por uma diferença superior a  $p_j$ .

Por fim, a discordância é total se a desvantagem  $(-\Delta_j)$  for grande o suficiente de forma a exceder um limiar  $v_j$ , denominado limiar de veto, que pode ser estabelecido pelo decisor. Diz-se então que o critério  $g_j$  “veta” a assertiva  $a_i S b_k$ .

Uma cálculo alternativo para este índice é apresentado por Mousseau & Dias (2004):

$$d_j(a_i, b_k) = 1 - \frac{p_j - \min [g_j(b_k) - g_j(a_i), p_j]}{p_j - \min [g_j(b_k) - g_j(a_i), q_j]} \quad (8)$$

E, o cálculo do índice  $d_j(b_k, a_i)$  se processa de forma análoga.

#### 2.4.5 Índice de credibilidade

Finalmente, a credibilidade da conclusão de  $a_i S b_k$  é fornecida pelo índice de credibilidade ( $\sigma_j(a_i, b_k)$ ), o qual pode ser calculado pela variante original de Yu (1992) e de Roy e Boyssou (1993):

$$\sigma_j(a_i, b_k) = C(a_i, b_k) * \prod_{j \in F'} \frac{1 - d_j(a_i, b_k)}{1 - C(a_i, b_k)} \quad (9)$$

onde  $F' = \{j \in F \mid d_j(a_i, b_k) > C(a_i, b_k)\}$

#### 2.4.6 Índice de corte

Após definido o índice de credibilidade, o limiar de corte  $\lambda$  é estabelecido para efetuar a dicotomia entre prevalência e não prevalência. Esse modelo traduz o menor valor que o índice de credibilidade  $\sigma_j(a_i, b_k)$  pode assumir para afirmar  $a_i S b_k$ . (FIGUEIRA et al., 2005). Sua relação de preferência será obtida por meio da comparação  $\sigma$  e  $\lambda$ , onde o valor assumido deve está entre 0,5 e 1.

$$a_i S b_k \leftrightarrow \sigma_j(a_i, b_k) \geq \lambda \quad (10)$$

#### 2.4.7 Procedimento de alocação

Yu (1992) define um processo de alocação como a composição de um conjunto de mecanismos que, apoiando-se sobre modelos de preferência explícitos, permitem alocar todas as alternativas as classes previamente definidas.

No ELECTRE TRI, a alocação de uma dada alternativa  $a_i$  é realizada através da comparação às sucessivas alternativas de referência de maneira a concluir a alocação a uma categoria. Este processo irá diferir de acordo com a regra aplicada: pessimista, que é a mais aplicada na prática ou otimista.

Para o processo otimista, também chamado disjuntivo, realiza-se a comparação da alternativa  $a_i$  ao pior perfil de referência  $b_k$ . Depois para o próximo

perfil até que se encontre um perfil  $b_k$  com índice de credibilidade superior ao nível de corte. Nesse instante, a alternativa  $a_i$  é alocada a uma categoria superior sugerida pelo perfil de referência  $b_k$  (SCHÄRLIG, 1996).

Por sua vez, o processo pessimista, chamado também por conjuntivo, realiza-se comparação da alternativa  $a_i$  aos perfis de referência, iniciando pela melhor alternativa. Depois para o próximo perfil de referência de  $b_k$  até que o índice de credibilidade seja superior ao nível de corte. Nesse instante, a alternativa  $a_i$  é alocada a uma categoria superior sugerida pelo perfil de referência  $b_k$  (SCHÄRLIG, 1996).

Schärlig (1996) ressalta ainda que é intuitivo que o procedimento pessimista seja mais exigente. Isso deve-se ao procedimento, uma vez que ele aloca a alternativa na categoria inferior a delimitada pelo perfil. Logo, podemos compreender o procedimento otimista como menos rigoroso, uma vez que ele aloca as alternativas em categorias superiores. De modo que é natural usar do procedimento pessimista quando necessário tomar decisões mais conservadoras e lançar mão do procedimento otimista quando deseja explicitar as ações por suas qualidades (YU apud SCHÄRLIG, 1996).

Vale ressaltar que o nível de corte tem um papel crucial na categorização das alternativas, dado que se um valor for elevado, as alternativas serão destinadas a categorias mais baixas no procedimento pessimista e ao contrário no otimista.

Através desses procedimentos o ELECTRE TRI permite a designação multicritério de cada alternativa de um conjunto A de um conjunto das classes pré-definidas.

## 2.5 SÍNTESE DO ESTADO DA ARTE E POSICIONAMENTO DESTE TRABALHO

Neste capítulo foram apresentados diversos estudos no contexto da análise de criticidade e gerenciamento de riscos, com foco especial na tomada de decisão de modo a auxiliar em ações mitigadoras de riscos. Percebe-se que há uma grande diversidade de pesquisa na área, porém poucas envolvendo a análise de decisão multicritério envolvendo o contexto de gerenciamento de risco como também classificação de equipamentos de acordo com sua criticidade.

Neste sentido, relações de dependência são observadas em sistemas, logo, as paradas de alguns componentes podem significar oportunidades para realizar a manutenção de outros componentes com um custo mais baixo, e com tempo de

interrupção da operação menor, contribuindo assim para um aumento do desempenho do sistema.

Deste modo, o caráter probabilístico da ocorrência de cenários acidentais e os diferentes tipos de consequências resultantes destes cenários caracterizam os riscos envolvidos nos processos de manufatura, que possuem sistemas de alta complexidade. Trabalhos como os de Brito *et al.* (2010) e Brito e Almeida (2009) que incorporam modelos multicritérios para avaliação de riscos podem ser encontrados na literatura, porém dentro do contexto do gás natural. Foi observado que, apesar de existirem estudos publicados na área de avaliação de criticidade muitos consideram apenas uma única dimensão na análise do risco. Brito e Almeida (2009) reforçam este ponto quando afirmam que existem algumas limitações com relação aos métodos tradicionais de análise e avaliação de risco aplicados em gasodutos.

Logo, as abordagens presentes na literatura além de não considerarem as múltiplas dimensões que impactos de falha podem causar, não avaliam no contexto de sistema industriais complexos. Sendo estes caracterizados por possuírem muitos componentes, com dependência operacional.

Por essa razão, esta pesquisa se propõe a construir um modelo para avaliação multidimensional de riscos em sistemas complexos, sendo considerados aspectos como a natureza estocástica do tema e a variedade de consequências envolvidas, assim como fatores relacionados ao processo de tomada de decisão na análise de risco, tais como a avaliação dos *tradeoffs* ligados à natureza multidimensional das situações de risco e a inclusão da relação entre o impacto dos eventos de falha e a perda associada a esses.

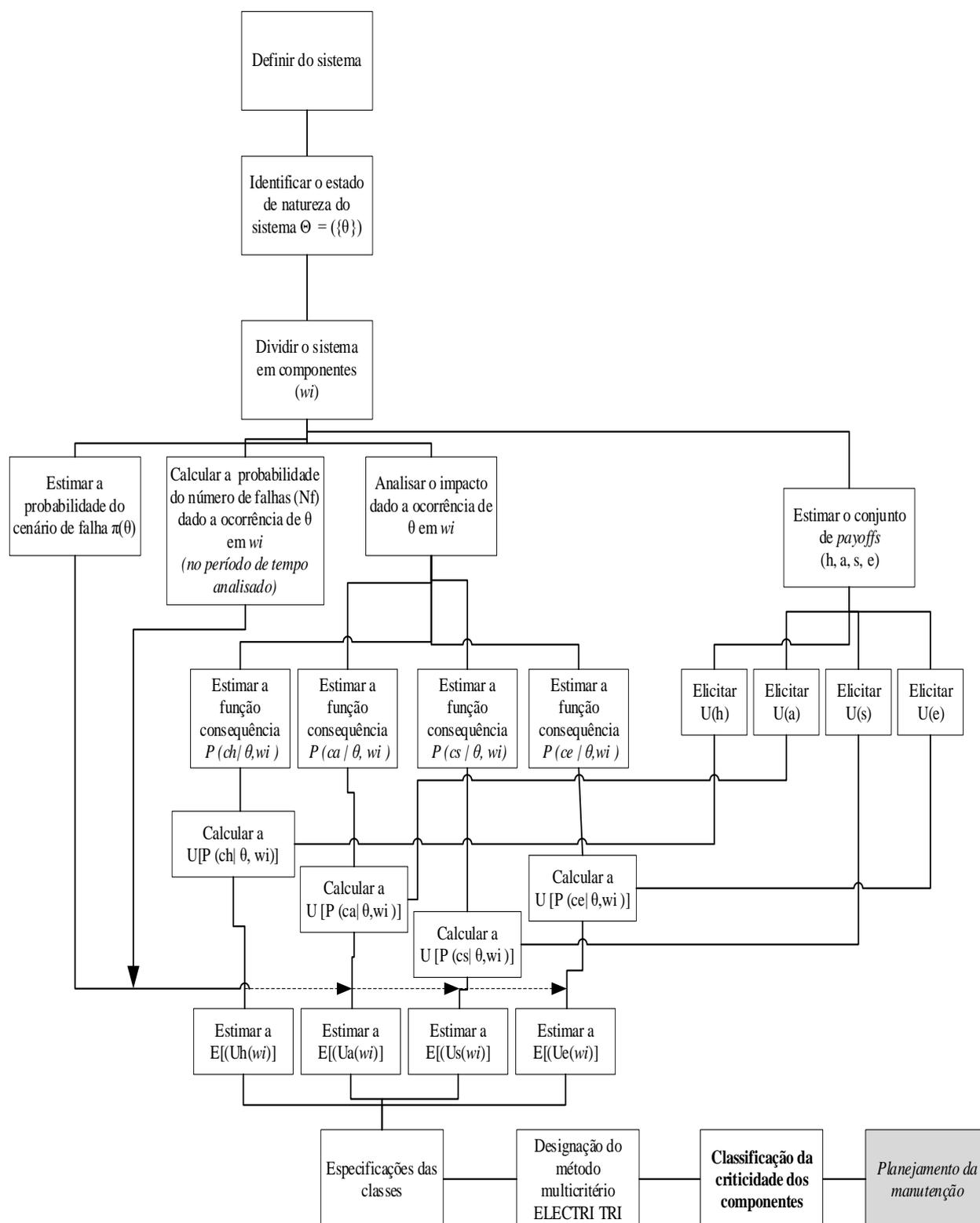
### 3 CONSTRUÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO

Neste capítulo é apresentada e descrita uma proposta de modelo multicritério para avaliação dos impactos que um evento de falha pode ter em múltiplas dimensões (humana, ambiental, financeira e ambiental) em sistemas complexos. Os resultados deste capítulo foram publicados no *INSID-2021* com o trabalho intitulado “*A Framework to Support Maintenance Planning for a Complex System Operating under Hazardous Conditions*” (MENEZES *et al.* 2021).

#### 3.1 A ESTRUTURA DO MODELO DE DECISÃO

A estrutura proposta acerca do processo de classificação de componentes de um sistema em categorias de risco decorrentes de eventos de falha é apresentada no fluxograma na Figura 4, de tal forma que sejam fornecidas condições para a aplicação do modelo de classificação em questão.

Figura 4 – Estrutura do modelo multicritério



Fonte: a autora, 2022

O modelo multicritério apresentado na Figura 4 avalia as consequências das falhas em quatro dimensões. Desta forma, para a análise das consequências, serão

utilizados elementos da teoria da decisão, onde “ $\theta$ ” é definido como estado da natureza, expressando a incerteza associada ao problema.

Analisando a problemática e, considerando que a relação entre o desempenho de cada componente e sua falha interfere diretamente na tomada de decisão em relação à aplicação dos recursos, ao identificar quais são os itens que precisam ser priorizados, se faz necessário dividir o sistema em componentes de modo a avaliar a particularidade de cada um, estabelecendo-se um conjunto  $A = \{w_1, w_2, w_3, \dots, w_n\}$  de alternativas.

Assim, este conjunto discreto corresponde à reunião de todos os componentes distintos por suas características. À vista disso, a abordagem da Teoria da Utilidade foi utilizada para o processo de análise quantitativa do risco, levando em conta as incertezas inerentes ao processo de maneira a permitir tratar adequadamente consequências de natureza probabilística (DE ALMEIDA, 2013). Portanto, as funções utilidades retratarão, para além de informações acerca de valor, as preferências do agente de decisão no que concerne o seu comportamento em relação ao risco (*i.e.* neutro, propenso ou avesso).

O modelo é estruturado com base no método multicritério ELECTRE TRI, desenvolvido para a problemática de classificação de alternativas. Adicionalmente, os métodos da família ELECTRE assumem uma estrutura de preferências não compensatória, assumida no contexto do problema tratado nesta dissertação, para o qual os métodos de função única de síntese não se adequam e as hipóteses rígidas requeridas por MAUT (Teoria da Utilidade Multiatributo) não são atendidas.

Além do mais, os métodos compensatórios podem ser muito afetados por distorções causadas pelos mecanismos de compensação direta. Em outras palavras, se um componente tem consequências ruins na dimensão humana, porém boas na dimensão financeira, essa compensação direta pode fazer com que ele seja classificado como risco baixo ou intermediário, não sendo apropriado para o estudo em questão, dado que a dimensão crítica é a humana.

Deste modo, o ELECTRE TRI evita esse tipo de distorção, realizando uma avaliação dos componentes sob a ótica conjunta de múltiplas dimensões de risco, permitindo comparar os componentes e classificá-los em categorias de risco pré-definidas.

## 3.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

O intuito do modelo desenvolvido nesta dissertação é o de classificar os equipamentos de um sistema complexo conforme sua criticidade. Nesse sentido, determinar a criticidade de um equipamento requer uma visão sistêmica do processo o qual está inserido, sob o ponto de vista operacional, financeiro, humano e ambiental. Verificando, assim, os objetivos e contextos específicos de aplicação que variam conforme cada setor industrial.

Portanto, como o foco do modelo é voltado para a análise de criticidade, é de suma importância definir sobre os equipamentos que estarão em operação ou etapa de projeto, assim como a sua importância para o processo produtivo e para determinação futura de uma política de manutenção adequada.

Diante dessa perspectiva, é importante uma compreensão com relação às questões vinculadas a função utilidade e entendimento do espaço das consequências em estudo.

### 3.2.1 Identificação das Dimensões das Consequências

Moubray (2000) pontua que cada falha afeta a organização de alguma maneira, apesar de seus efeitos serem distintos. Guo *et al.* (2009) reforça que os equipamentos petroquímicos estão sujeitos a vários modos de falha, e cada modo pode ter consequências de falha diferente. Portanto, a ocorrência de uma falha pode afetar além da operação, a qualidade do produto, a segurança e o meio ambiente, impactando diretamente no tempo e gerando custos.

Conseqüentemente, a ocorrência de uma falha pode levar a sérias perdas econômicas, poluição ambiental e consequências catastróficas (KWON, 2006). Assim, as consequências das falhas definem se os recursos serão utilizados para prevenir as suas ocorrências. Deste modo, é de suma importância avaliar o impacto de uma falha.

No estudo de Khan & Haddara (2004) a estratégia de manutenção baseada no risco (RBM) proposta visa reduzir o risco geral de falha das instalações operacionais. Para isto, o modelo visa direcionar melhor recursos através das atividades de manutenção focadas em áreas de alto e médio risco, enquanto nas áreas de baixo risco o esforço é minimizado para otimizar o planejamento da manutenção.

A metodologia desenvolvida por Khan & Haddara (2004) busca responder cinco questões relacionadas à integridade e operação livre de falhas do sistema:

- O que pode fazer com que o sistema falhe?
- Como isso pode causar a falha do sistema?
- Quais seriam as consequências se falhar?
- Qual a probabilidade de ocorrer?
- Quão frequente é uma inspeção/manutenção do componente que evitariam tal falha?

Através das respostas para estas perguntas a metodologia RBM obtêm as consequências (relacionadas a segurança, economia e ambiente) de um sistema de maneira a minimizar seus impactos (*i.e* interrupção/falhas), além de resultar em um ativo com um melhor desempenho e otimização do uso de recursos.

Consequentemente, estratégias de manutenção baseada no risco podem ser utilizadas para melhorar o planejamento da manutenção por meio de procedimentos de decisões ideais em diferentes fases do ciclo de vida de um sistema (KHAN & HADDARA, 2004).

Adicionalmente, a aplicação dos conceitos de confiabilidade na programação da manutenção deu início à nova geração da manutenção, que enfatizava a produção de produtos e serviços de alta qualidade, mas também se preocupava com a segurança da força de trabalho envolvida nas operações e com a preservação ambiental (Khan e Haddara, 2003; Arunraj e Maiti, 2007).

Neste sentido, a difusão ampla dos métodos de gestão de risco deveu-se em grande parte à necessidade das empresas de operar sistemas complexos livres de acidentes e com excelência operacional. Acidentes causados por falhas nas instalações podem trazer sérias consequências à integridade dos operadores do sistema (inclusive, causando mortes), danos ao meio ambiente, às próprias instalações, assim como, à própria imagem (Tixier et al., 2002; Aven e Korte, 2003).

À vista disso, o modelo proposto nesta dissertação avalia as consequências das falhas com base em quatro grupos, que são considerados dimensões de risco segundo o estudo de Khan & Haddara (2004). Estes grupos serão, ao longo dos capítulos, denominados de dimensões de consequências ou perdas, que consistem em critérios relevantes para o problema e o contexto analisado. Logo, as quatro

dimensões de consequências consideradas são: dimensão humana (h), dimensão ambiental (a), dimensão financeira (s) e dimensão operacional (e).

Dessa maneira, a seguir serão apresentadas as descrições de cada uma destas dimensões de consequências consideradas:

- Dimensão humana (h) – Considera nesta dimensão os danos às pessoas atingidas pelas consequências das falhas. Logo, a estimativa é realizada com base no número de pessoas que foram impactadas gerando dano físico, ou mesmo ocorrência de morte;
- Dimensão ambiental (a) – Nesta dimensão de consequência, leva-se em consideração a área de vegetação natural (ou recuperada) afetada em decorrência de um evento de falha, seja destruição por fogo (em caso de incêndios) ou poluição do solo por produtos químicos. Portanto, a medida estimada de área destruída será em m<sup>2</sup>;
- Dimensão financeira (s) – É levado em consideração para essa dimensão os prejuízos monetários decorrentes das falhas ocorridas. Deste modo, para realizar a estimativa das consequências é considerado os custos diretos de reparo, negócios perdidos, multas e indenizações por danos físicos;
- Dimensão operacional (e) – Considera para esta dimensão a influência das consequências das falhas quanto ao comportamento do sistema produtivo. Ou seja, perda de desempenho devido a falha do componente. Isso é estimado a partir do *downtime* de maneira a avaliar as consequências.

### 3.3 ANÁLISE DAS CONSEQUÊNCIAS

As consequências e os maiores impactos dos acidentes estão diretamente relacionados a natureza do material liberado. Então, de fato, quando um material inflamável entra em contato com um oxidante, eles podem reagir produzindo uma energia termal e o processo de combustão pode resultar tanto em fogo quanto em explosão, este segundo ocorrendo quando há uma mistura de oxigênio com o gás combustível em uma determinada proporção.

Além disso, emissões tóxicas podem resultar em nuvem no ar, a severidade e extensão dessas nuvens dependem das propriedades físico-químicas e toxicológicas

das substâncias liberadas, assim como das condições atmosféricas e geográficas. Deste modo, pode haver diversas consequências para os acidentes.

Desse modo, a magnitude e a severidade das consequências fazem com que seja necessário o desenvolvimento de um gerenciamento mais apropriado e efetivo que proporcione a obtenção de resultados adequados (ALENCAR; DE ALMEIDA, 2015). Logo, o modelo proposto neste trabalho busca fornecer subsídios para que, satisfeitos os critérios em um processo continuado, proceder a identificação e classificação dos componentes do sistema em operação em categorias hierárquicas de risco.

Portanto, para a análise das consequências, baseado em Berger (1985) uma abordagem probabilística é usada para lidar com incertezas por meio de uma distribuição de probabilidade sobre consequências não determinísticas e a elicitación de funções de utilidade para essas consequências.

A função utilidade trata do desenvolvimento da ideia de valor para as consequências. Como pontuado por Berger (1985), ao avaliar as possíveis consequências das ações, é necessário verificar os valores atribuídos às consequências. A letra  $P$  diz respeito ao conjunto de todas as distribuições de probabilidade. Para se trabalhar com todos os valores e preferências relacionadas à  $P$  é importante, como forma de facilitar o desenvolvimento da análise, realizar a construção da função  $U(c)$ .

Posto isto, levando em consideração os conceitos de Berger (1985). Considera-se:

- I. A distribuição de probabilidade que irá descrever o comportamento da consequência dado uma falha. Então, é necessário avaliar um conjunto de distribuições de probabilidade  $\mathcal{P}$  sobre possíveis consequências  $c$  de um conjunto  $C$ .
- II. Um conjunto  $\theta$  de estados do sistema. Um elemento  $\theta$  em  $\theta$  representa uma influência nos possíveis resultados de um cenário (ação). Não se tem controle sobre este elemento. Não se sabe qual estado irá se concretizar, é sob esta incerteza que se deve decidir por um cenário e aceitar as consequências.
- III. Logo, se se decide pelo componente  $w$  e o cenário acidental  $\theta$ , então tem-se a distribuição de probabilidade  $P(c | \theta, w_i)$  sobre possíveis

consequências. Esta aplicação que leva um par ordenado  $(\theta, w_i) \in \Theta \times A$  em um elemento  $\mathcal{P}$  é chamado de “Função consequência”.

Deste modo, a probabilidade de ocorrer  $c$  (consequência) dado que ocorreu  $\theta$  (cenário acidental) em  $w_i$  (componente), é dada pela distribuição de probabilidade  $P(c | \theta, w_i)$ . Logo, de modo geral, “ $U(\theta, w_i)$ ” é a utilidade quando o cenário “ $\theta$ ” e o componente “ $w_i$ ” são considerados.

A elicitación da função utilidade ocorre em um intervalo fechado de consequência, onde um resultado nulo (sem impactos) é associado ao valor máximo da utilidade, enquanto o valor mínimo da utilidade está relacionado a maior consequência estimada.

### 3.4 ESTIMAÇÃO DAS PROBABILIDADES DE OCORRÊNCIA DOS CENÁRIOS ACIDENTAIS

Segundo Frodick (1997), alguns tipos de problemas podem surgir com a estimação dos riscos, que são: problemas com a confiabilidade dos dados, expressão do risco estimado e a disponibilidade de dados históricos.

Desta forma, a estimação das probabilidades dos eventos acidentais é difícil, podendo ser realizada através de três formas: por análise histórica em bancos de dados, ou in loco; pela elicitación do conhecimento e experiência do especialista ou pela combinação dos dois modos (KIRCHHOFF, 2004).

Este estudo se deu através do uso de dados históricos sobre vazamentos encontrados em bases de dados nacionais e internacionais, prática bastante utilizada na literatura da área (PAPADAKIS, 1999; JO & AHN, 2005; HENSELWOOD & PHILLIPS, 2006; SLKAVOUNOS & RIGAS, 2006). Tendo a base de dados, faz-se uso de frequências como estimativas de probabilidade, para verificar as causas dos acidentais e quais foram mais recorrentes.

### 3.5 CÁLCULOS DAS PROBABILIDADES DAS CONSEQUÊNCIAS

A literatura apresenta muitos estudos relacionados com a análise de riscos em sistemas levando em consideração apenas uma única dimensão, a operacional, verificando assim o impacto da falha para o desempenho do processo. Por sua vez, a

metodologia desenvolvida por Khan & Haddara (2004) apresenta quatro dimensões que são impactadas devido a falha, entretanto a análise é construída levando em consideração uma conversão de escala de forma rudimentar. Neste contexto, o modelo de decisão multicritério apresentado levará em consideração as particularidades de cada dimensão, sendo estas: humana, ambiental, financeira e operacional.

Diante dessa perspectiva, é assumida nesta pesquisa uma racionalidade intercritério não compensatória, apresentada por muitos decisores, e são aplicados os valores das utilidades esperadas para o cálculo dos riscos em cada dimensão de perda, que servirão como *input* para a construção de relações não-compensatórias de sobreclassificação que permitam designar cada componente a uma categoria de risco.

Embora esse procedimento possa desconsiderar possíveis interações entre as dimensões de consequências, que afetam a estrutura do modelo no que concerne aos julgamentos de preferência de um decisor, o modelo aqui proposto é desenvolvido para situações em que estas interações possam ser desconsideradas de maneira a não comprometer a qualidade dos resultados. Abre-se mão de um maior rigor no processo de modelagem para obterem-se maiores ganhos no processo de elicitación das preferências do decisor (EDWARDS & BARRON, 1994).

Portanto, buscando diminuir a imprecisão tanto na avaliação dos critérios esta etapa tem por intuito apresentar as estimativas das consequências associadas aos diversos eventos de falha através da obtenção de um conjunto de possível consequências (perdas) ou *payoffs*.

Deste modo, os conjuntos de *payoffs* em questão, envolve as dimensões da análise de risco a serem exploradas como critérios do modelo de classificação. Sendo, portanto, as consequências nas dimensões humana, ambiental, financeira e operacional decorrentes de falhas no sistema de manufatura a ser estudado, e são representadas respectivamente por  $P_h = \{p_h\}$ ,  $P_a = \{p_a\}$ ,  $P_s = \{p_s\}$  e  $P_e = \{p_e\}$ .

Consequentemente, de acordo com Brito *et al.* (2010) a distribuição de probabilidade de uma dada consequência, conhecida como função consequência  $P$ , é representada pela probabilidade de se obter uma dada consequência  $p$ , dado que ocorreu um cenário  $\theta_{jk}$  em um componente  $w_i$  do sistema analisado. Logo, para as dimensões em estudo, a função consequência é representada da seguinte forma:  $P(c_h | \theta, w_i)$ ,  $P(c_a | \theta, w_i)$ ,  $P(c_s | \theta, w_i)$  e  $P(c_e | \theta, w_i)$ .

### 3.5.1 Estimação da Função Consequência Humana – $P(c_h | \theta, w_i)$

A dimensão humana foi analisada levando em consideração o número de pessoas expostas ao acidente que são atingidas devido a falha. Além do mais, assim como os dados históricos, o risco individual, ou seja, de impacto humano, limita-se bastante à probabilidade de ocorrência de fatalidade, sendo insuficiente na consideração de diferentes graus de ferimento sobre os seres humanos. Portanto, trabalha-se nesta dissertação com um único tipo de consequência (probabilística): a probabilidade  $P$  de ocorrência de um determinado dano físico em uma pessoa, comumente uma fatalidade.

Logo, com o intuito de facilitar o cálculo da função consequência uma função *Probit* pode ser assumida nesta dimensão de modo a se ter a probabilidade independente de uma pessoa ser atingida diante da falha de um determinado componente. A *Probit* utilizada pode ser encontrada no *Purple Book* e tem por intuito tornar a curva de respostas mais consistente (VROM, 2005).

Lanchance *et al.* (2011) pontuam que as funções *Probit* são particularmente úteis na análise quantitativa de risco, uma vez que pode fornecer as probabilidades de danos para a gama de acidentes incluídos na avaliação de riscos (LACHANCE *et al.*, 2011). A hipótese assumida no modelo é que a resposta de cada indivíduo em relação a um evento de falha é caracterizada por uma distribuição gaussiana, muito embora cada indivíduo possa reagir de uma forma diferenciada.

Desta forma, a relação entre o efeito da falha e a exposição pode ser avaliada através da função *Probit*, apresentada pela equação 11, para obter a probabilidade de uma pessoa ser atingida diante de um evento de falha no sistema.

$$P = \frac{2}{\pi} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (11)$$

Consequentemente, a função irá calcular a probabilidade dos efeitos do dano originários de um evento de falha, sendo  $P$  a probabilidade de uma pessoa ser atingida diante deste evento, tendo “t” é o tempo de exposição em minutos e “x” é o número de pessoas expostas.

Concluído o cálculo da *Probit*, tem-se a probabilidade  $p$  de uma pessoa ser atingida diante da falha. Através desta probabilidade realiza-se em seguida, o cálculo

da probabilidade da consequência na dimensão humana  $c_h$  devido a ocorrência de um cenário acidental  $\theta$  em um determinado componente  $w_i$  corresponde a uma distribuição binomial, modelada pela expressão 12:

$$P(c_h | \theta, w_i) = \binom{n}{c_h} * p^{c_h} * (1 - p)^{n - c_h} \quad (12)$$

Onde:

$c_h$  – Corresponde ao número de pessoas atingidas;

$p$  – É a probabilidade de uma pessoa ser atingida e sofrer danos, calculada através da *Probit*;

$\theta$  – Corresponde ao cenário acidental em questão;

$w_i$  – É o componente do sistema em estudo;

$n_i$  – Corresponde ao número máximo estimado de pessoas a serem atingidas associada ao componente  $w_i$ ;

Para estimação do  $n_i$  leva-se em conta o número esperado de pessoas próximo a área do componente, tendo como consideração o momento de máxima concentração populacional.

### 3.5.2 Estimação da Função Consequência Ambiental – $P(c_a | \theta, w_i)$

A segunda função consequência do modelo corresponde aos impactos ambientais decorrentes de eventos de falha no sistema.

Muitos estudos medem a dimensão de consequência ambiental em termos de custos, porém, os riscos ambientais estão diretamente relacionados com a construção e layout (geográfica) como também, mudanças significativas do uso do solo e as consequências para a paisagem e a biodiversidade.

Portanto, considerando como indicador dos impactos ambientais esta dimensão é avaliada através do parâmetro de área ( $m^2$ ) atingido, adotando-se o raio de alcance a partir do ponto de ocorrência da falha. Isto posto, o uso da distribuição normal está associado ao fato de que aproxima de forma bastante satisfatória as curvas de frequências de medidas físicas, essa curva é conhecida função gaussiana.

Assume-se, portanto, a hipótese que a distribuição das respostas para o impacto ambiental é gaussiana. Logo, neste modelo, para facilitar a obtenção da

distribuição probabilística entre os vetores pelos especialistas, utilizou-se a distribuição normal, representada pela função:

$$F(c_a | \theta, w_i) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (13)$$

### 3.5.3 Estimação da Função Consequência Financeira P ( $c_s | \theta, w_i$ )

No contexto deste estudo, para a construção da função consequência financeira, devem-se considerar uma combinação de aspectos tais como dispêndios originários de acidentes, compensações e manutenção.

Vale ressaltar que, a depender da configuração física do sistema analisado, e se houver formas de isolar o sistema afetado (acidentado) à menor região possível, é provável que as consequências financeiras sejam menores, devido ao menor impacto à receita, perda de recursos e capacidade do sistema.

Kardec *et al.* (2019) estabelecem métricas de custo para quantificar os equipamentos com maior impacto financeiro:

- *Custo de perda de produção*: resultante da parada de produção ou qualidade do produto, causados por falha ou baixo desempenho dos ativos.
- *Custos diretos*: importância destinada para manter a função dos equipamentos, como preventivas, inspeções regulares, reparos e atividades corretivas em geral.
- *Custos indiretos*: aqueles relacionados com a estrutura gerencial e de apoio administrativo, custos com análises e estudos de melhoria, Engenharia de Manutenção e supervisão.

Portanto, para uma modelagem da função-consequência associada a essas perdas, são assumidas as hipóteses levantadas em decorrência de alguma interrupção do sistema. Considerando que a distribuição de probabilidade para perda diante de uma falha é normal, sua soma também seguirá uma distribuição normal, assim, ao estimar a média e o desvio padrão do lucro cessante, a distribuição de probabilidade será conhecida.

O uso da distribuição normal se dá pois esta costuma modelar de forma satisfatória variáveis que se originam da soma de várias variáveis aleatórias, como é o caso para a dimensão financeira, como mostrado anteriormente.

Com isso, a função consequência para os impactos financeiros poderá ser representada pela f.d.p (função densidade de probabilidade):

$$F(c_s | \theta, w_i) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (14)$$

### 3.5.4 Estimação da Função Consequência Operacional – P ( $c_e | \theta, w_i$ )

A consequência operacional ( $c_e$ ) pode ser avaliada pelo parâmetro de tempo de inatividade (*downtime*), sendo medida no momento em sistema de alimentação estará indisponível para operação, até que seja restaurado com os padrões exigidos por órgãos reguladores.

Alinhado a isso, o *downtime* do subsistema está diretamente relacionado pela configuração do sistema. Ou seja, no caso de haver formas alternativas de isolar o sistema afetado, e realimentar o sistema com outro “caminho” é provável que as consequências operacionais sejam menores.

Assim, a função de densidade de probabilidade normal pode ser utilizada para o cálculo da função consequência, que representa a proporção do tempo no qual o sistema fica inoperacional devido a falhas e manutenção. A função consequência é expressa por:

$$F(c_e | \theta, w_i) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \right) \quad (15)$$

### 3.6 ANÁLISE DA PROBABILIDADE DO NÚMERO DE EVENTOS DE FALHA – P ( $N_f | \theta, W_i$ )

Identificar o número de eventos que podem gerar os impactos pode garantir que não haja desperdício de tempo e esforços para mitigação dos impactos. Neste

sentido, é importante avaliar o impacto (*i.e.*, a perda) dado a ocorrência do número de eventos.

Assim, a partir da análise que uma vez que um número de eventos é identificado, torna-se possível considerar o que acontece devido a essa ocorrência, avaliando suas consequências e decidindo o que (e se) deve ser feito para antecipar, prevenir, detectar ou corrigi-lo. Dessa forma, a distribuição de Poisson é utilizada pois modela a probabilidade de eventos ocorrendo em um período fixo.

Logo, tomando por base a distribuição de Poisson (Equação 16), é possível obter a partir da taxa de falha a probabilidade do número de falha em cada componente do sistema.

$$P(X = k) = \frac{e^{-\lambda} * \lambda^k}{k!} \quad (16)$$

Onde:

$P(X = k)$  – A probabilidade de  $X$  eventos, dado o acontecimento de  $\lambda$ ;

$\lambda$  – Parâmetro da taxa de falha (falhas/ano);

$X$  – Número esperados de falhas, ou seja, da ocorrência de eventos;

$e$  – Número de *Euler*, base dos logaritmos naturais.

Verifica-se, portanto, a probabilidade de  $X$  ocorrência do evento em  $[0, t)$  até a distribuição se aproximar de zero.

### 3.6.1 Análise da distribuição multinomial

Existem situações em que se deseja observar resultados simultâneos de várias variáveis aleatórias. Isto se faz necessário para o estudo em questão de modo a analisar a distribuição conjunta de probabilidades, ou seja, o comportamento simultâneo de probabilidades.

O ponto que se faz presente no modelo proposto é que sistemas complexos podem ser compostos por múltiplos componentes com os mais diversos comportamentos de falha. Ou seja, um componente pode ter uma taxa de falha muito maior do que outro, de forma que se faz necessária a análise da probabilidade de

mais de um evento no período analisado, para que não se tenha disparidade nos resultados.

O mesmo raciocínio segue para um componente que pode ter consequências de impacto intermediário, mas se a taxa de falha for muito alta, ele tende a ser mais crítico, se comparado a um componente cuja falha tem grande impacto, porém a probabilidade de isso acontecer é muito baixa.

Esse raciocínio não foi necessário ser conduzido por Brito et al. (2010) pois em seu estudo é tratado eventos raros que se aplicam no contexto de gasoduto. Com relação a sistemas complexos, a diversidade de componentes faz com que seja necessário pois, para que seja possível analisar os impactos das consequências seria inapropriado ignorar a ocorrência de mais de um evento de falha no período de análise.

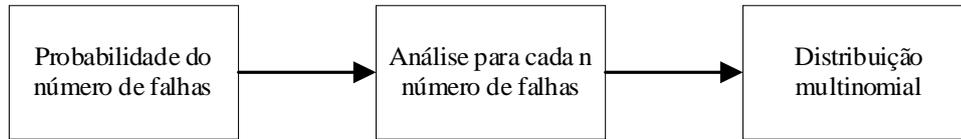
Portanto, como dito anteriormente a análise da distribuição de probabilidade conjunta leva em consideração duas ou mais variáveis tendo a necessidade de conhecer o comportamento conjunto delas. Neste sentido, é definida função de distribuição conjunta  $F$  de duas variáveis aleatórias  $X$  e  $Y$  por (HOEL, PORT & STONE, 1978):

$$F(x, y) = P(X \leq x, Y \leq y), -\infty < x, y < +\infty \quad (17)$$

À vista disso, pode-se utilizar o conceito da distribuição multinomial para realizar o cálculo da probabilidade de  $n$  eventos de falha em um período analisado, de modo a verificar o comportamento de cada consequência a partir da ocorrência de um determinado conjunto de resultados (devido as consequências).

Diante dessa perspectiva, para o caso das perdas humanas, para cada número  $n$  de falha, tem-se a distribuição multinomial sendo utilizada para compor a probabilidade de um certo número de perdas humanas no período  $t$  analisado devido  $n$  eventos de falha. A Figura 9 apresenta, de forma objetiva, como a distribuição multinomial se dá.

Figura 5 - Análise conjunta da perda humana



Fonte: a autora, 2022.

Deste modo, a função de probabilidade conjunta das variáveis, para a dimensão humana, por se tratar de consequências de natureza discreta, se ajusta a uma distribuição multinomial:

$$P(x_1, x_2, \dots, x_k) = \frac{n!}{x_1! x_2! \dots x_k!} * (p_1)^{x_1} * (p_2)^{x_2} \dots (p_n)^{x_n} \quad (18)$$

Em que  $n$  é o número de eventos de falha,  $p_1$  e  $p_2 \dots p_n$  são, respectivamente, a probabilidade de ocorrência do número de impacto (*i.e.*, perdas) definidas com o auxílio das funções consequências.  $x_1, x_2, \dots, x_k$  são inteiros não negativos e representam o número de pessoas, para o caso da consequência humana.

Por outro lado, as dimensões ambiental, financeira e operacional, seguem uma lógica distinta, pois se trata de consequências em um intervalo contínuo. Logo, tem-se a composição da distribuição de probabilidade para a soma de variáveis normalmente distribuídas.

Deste modo, as variáveis que formam a distribuição de probabilidade podem ter qualquer média e desvio. Assim, para padronizar o conjunto de dados, com média  $= 2\mu$  e desvio padrão  $= \sigma * \sqrt{2}$  utiliza-se a seguinte fórmula:

$$z = \frac{x - 2\mu}{\sigma * \sqrt{2}} \quad (19)$$

Consequentemente, para estas dimensões, o cálculo da probabilidade conjunta será expresso pela seguinte equação:

$$P(x)_{geral} = p_1 * f(x)_1 + p_2 * f(x)_2 + p_3 * f(x)_3 + \dots + p_n * f(x)_n \quad (20)$$

A partir desses cálculos obtêm-se a distribuição de probabilidade de acordo com a definição do espaço de consequência e, será aplicada no cálculo da utilidade esperada.

### 3.7 TEORIA DA UTILIDADE

Diante do problema de classificação de componentes de sistemas complexos em categorias de risco, uma dificuldade apresentada na pesquisa bibliográfica é a realização da classificação agregando simultaneamente risco sobre seres humanos, riscos ambientais, riscos financeiros e riscos operacionais.

Isto posto, apesar do uso do conceito de risco atrelado a Teoria da Decisão realizar a transformação de todas as possíveis naturezas de consequências em uma única escala, a escala de utilidade, a aplicação da Teoria da Utilidade faz uso de hipóteses rígidas acerca do comportamento do decisor e de sua estrutura de preferências (Almeida, 2005).

Portanto, quando se trabalha com incertezas a teoria da utilidade descreve uma classe de modelos projetados para formalizar a maneira em que um tomador de decisão escolhe entre cursos alternativos de ação quando as consequências de cada curso de ação não são conhecidas no momento em que a escolha é feita.

Posto isto, considera-se que o decisor, quando avalia o peso das consequências dos cenários disponíveis, leva em consideração as probabilidades associadas as consequências. Deste modo, a preferência de um decisor por uma consequência poderá ser expressa pela função utilidade, baseada apenas no valor esperado da utilidade. Como apresentado por Keeney e Raiffa (1976) os valores da função utilidade são definidos em um intervalo de escala entre [0,1] onde o valor “0” estará associado ao “menos preferível” e “1” com o “mais preferível”. Logo, a utilidade esperada destas consequências é apresentada pela seguinte equação para casos contínuos:

$$EU(\theta, r) = \int_c P(c | \theta, w_i) U(c) dc \quad (21)$$

E, para consequências em casos discretos é utilizada a equação apresentada a seguir:

$$EU(\theta, r) = \sum_c P(c | \theta, w_i) U(c) \quad (22)$$

Trata-se, portanto, de um valor esperado, dado pela soma ponderada das utilidades possíveis com suas probabilidades de ocorrência. Onde o cenário “ $\theta$ ” e o componente “ $w_i$ ” são considerados. Conseqüentemente, a utilidade combina a função consequência (*i.e.*, distribuição de probabilidade de cada consequência) e a função utilidade destas consequências.

Adicionalmente é importante pontuar que as distribuições são consequências de um cenário, fazendo com que esta utilidade induza preferências no cenário, jamais o contrário. Ou seja, não faz sentido dizer que um indivíduo tem preferências por ações, que são representadas neste estudo por cada componente “ $w_i$ ”.

### 3.7.1 Avaliação intracritério

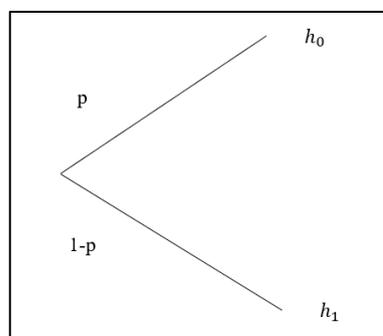
A eliciação de uma função utilidade  $U$  sobre um conjunto  $A$  é um aspecto importante da teoria da decisão, pois permite compreender a atitude do decisor em relação ao risco sobre as consequências definidas. O método mais utilizado é o da loteria de *payoffs*, ou seja, a loteria de apostar na megasena, onde o decisor tem uma quantia com certeza de dinheiro para postar (por exemplo,  $x$  reais) e precisa definir o valor de probabilidade  $p$  a qual é indiferente em ficar com o dinheiro ou entrar no jogo da loteria.

Em outras palavras, o decisor se torna indiferente em ter os  $x$  reais com certeza ou arriscar em uma loteria para ganhar um prêmio  $y$  com a probabilidade  $p$  ou perder o jogo com a probabilidade  $1 - p$ .

Assim sendo, realizando a eliciação da função utilidade na dimensão humana  $U(h)$  de tal forma que  $h_0 \leq h \leq h_1$ , onde “ $h_0$ ” representa o menor valor do número de pessoas atingidas, sendo “ $h$ ” um valor dentro deste intervalo e “ $h_1$ ” o maior valor. Portanto, para esta dimensão é assumido que um nível considerado alto de pessoas atingidas seja menos preferível. Deste modo, a avaliação da atitude do decisor quanto ao risco, leva em consideração uma loteria de 50-50, ou seja, 50% de se obter o menor valor ( $h_0$ ) e 50% de ser obter o maior valor ( $h_1$ ) sob a consequência na dimensão humana  $[h_0, p; h_1, 1 - p]$ , onde compara-se esses extremos com a consequência esperada. Então, pergunta-se ao decisor se uma chance 50-50 para “ $h_0$ ” e “ $h_1$ ” é

preferível, indiferente ou menos preferível a uma consequência certa (sendo a soma ponderada dos extremos):  $\bar{h} = (h_0 + h_1) / 2$ .

Figura 6 – Loteria [ $h_0, p$ ;  $h_1, 1-p$ ]



Fonte: a autora, 2022

De forma análoga foi realizada a eliciação para as demais dimensões, de tal forma que avaliasse um intervalo fechado de consequências. Levando em consideração que o valor máximo está relacionado a uma consequência nula, ou seja, não houve perdas, e o valor mínimo atrelado as maiores consequências.

Adicionalmente, é importante ressaltar que na consequência humana os valores possuem um caráter discreto e enumeráveis (número de pessoas atingidas) e, já nas demais dimensões considera-se que os valores são contínuos para fins da estimação da função utilidade.

Desta forma, o decisor obteve um comportamento averso ao risco quanto a dimensão humana, tendo, portanto, um comportamento conservador quando se trata de questão relacionadas a vidas humanas. Já nas dimensões ambiental e operacional têm-se um comportamento neutro ao risco. E, na dimensão financeira uma propensão ao risco.

### 3.7.2 Função utilidade

Mediante a análise anterior, as funções utilidades foram determinadas a partir de uma simulação com os diferentes comportamentos de maneira a avaliar o que possui o mais adequado diante das consequências que cada uma representa.

Logo, as equações utilizadas neste modelo para o cálculo das funções utilidades que leva em consideração as atitudes do decisor com relação ao risco são descritas a seguir:

- Aversão:

$$U(c) = -ax^3 + bx^2 - cx + z \quad (23)$$

- Neutralidade:

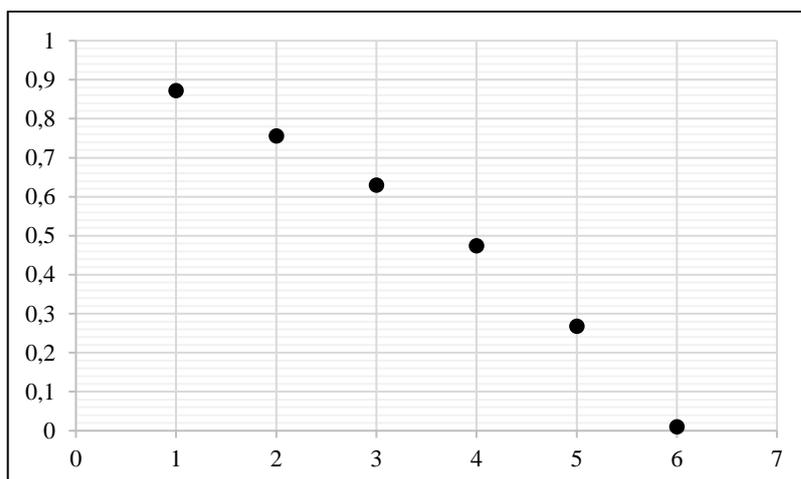
$$U(c) = -ax + z \quad (24)$$

- Propensão:

$$U(c) = ax^3 + bx^2 - cx + z \quad (25)$$

A primeira equação apresenta um comportamento averso ao risco, “x” define os valores da consequência considerada uma dada dimensão de consequências. O comportamento é apresentado na Figura 6:

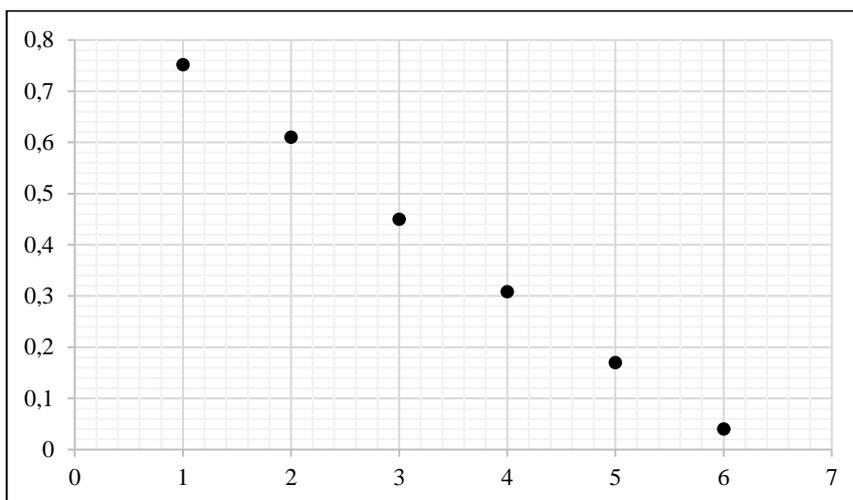
Figura 7 - Função utilidade unidimensional: decisor averso ao risco



Fonte: a autora, 2022

O comportamento de neutralidade (Figura 7) é representado de forma linear pela segunda equação, “a” “b” e “c” > 0 são constantes que asseguram que “U(c)” está dentro do intervalo [0,1], enquanto que “x” representa os valores da consequência considerada numa dada dimensão de consequências.

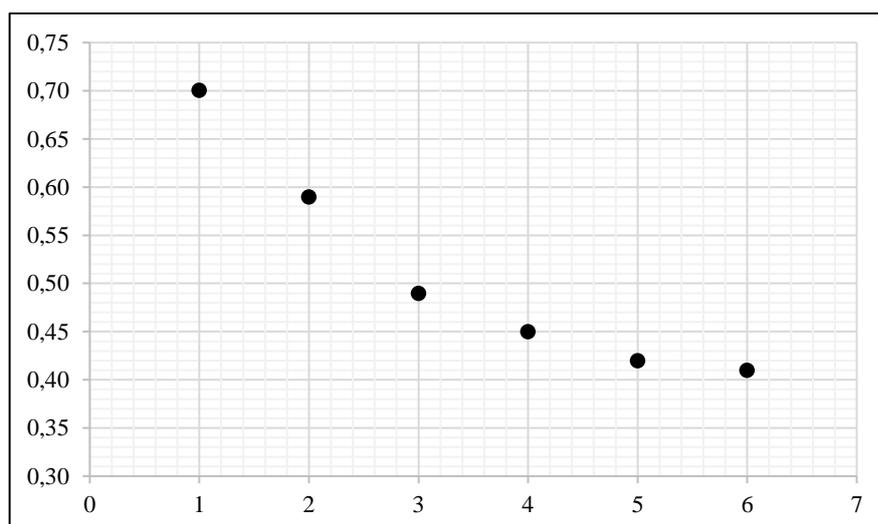
Figura 8 - Função utilidade unidimensional: decisor neutralidade ao risco



Fonte: a autora, 2022

A última equação será utilizada em situações de propensão ao risco. Esta função indica que quanto maior for o valor adotado para “x” mais indesejável é a situação para o decisor, onde “y” representa os valores da consequência considerada numa dada dimensão de consequências. Este tipo de comportamento é representado pela Figura 8.

Figura 9 - Função utilidade unidimensional: decisor propensão ao risco



Fonte: a autora, 2022

Continuamente, na avaliação intracritério, para determinação da utilidade das consequências é necessário a definição de suas funções. Posto isto, a distribuição de

probabilidade mediante uma função consequência  $P$ , é representada pela probabilidade de se obter uma dada consequência  $c$ , dado que ocorreu o cenário  $\theta$  de falha em um componente do sistema de alimentação, que no caso da dimensão humana é representada por  $P(c_h | \theta, w_i)$ . De forma análoga, se obtêm esta função para as demais dimensões  $P(c_a | \theta, w_i)$ ,  $P(c_s | \theta, w_i)$  e  $P(c_e | \theta, w_i)$ .

### 3.8 CÁLCULO DA UTILIDADE ESPERADA – $E[U_k(w_i)]$

Para o caso da dimensão humana, por se tratar de uma variável discreta, a utilidade esperada para a função consequência sobre seres humanos, é obtida então pela equação 26:

$$E[U_h(w_i)] = \sum_0^{\infty} u(x)P(c_h | \theta, w_i) \quad (26)$$

Por outro lado, as demais dimensões são variáveis contínuas, desta forma o somatório é substituído por uma integral. De posse das funções utilidade estimadas para as consequências ambientais, financeiras e operacionais, como apresentado na seção 4.4.2, calcula-se a utilidade esperada através da Equação (27):

$$E[U_k(w_i)] = \int_0^{\infty} u(x) P(x)_{geral} \quad (27)$$

### 3.9 ESPECIFICAÇÃO DAS CATEGORIAS DE RISCO E DOS PERFIS QUE AS LIMITAM

Delineados os critérios do modelo, pode-se inferir de forma rápida os riscos humanos, ambientais, financeiros e operacionais de maneira a minimizá-los. Entretanto, o modelo proposto neste estudo busca avaliar os riscos através de uma escala decrescente de “riscos globais” de forma a obter informações para que medidas sejam tomadas prioritariamente sobre as categorias cujos componentes que possuam os riscos mais críticos estão alocados.

Portanto, o uso da metodologia multicritério de sobreclassificação se torna útil para avaliar cada componente à luz dos critérios acima mencionados. Assim, o ELECTRE TRI, amplamente utilizado na literatura em problemas de classificação,

apresenta-se como um método aplicável para o problema em questão, visto que se busca a classificação de componentes em categorias hierárquicas de risco estabelecidas *a priori* de maneira a explorar as relações não compensatórias de sobreclassificação.

Deste modo, o principal propósito de um método de apoio a decisão inserido dentro de uma problemática de classificação é a designação de alternativas a categorias pré-definidas. Por sua vez, a alocação de uma alternativa  $a_i$  resulta de sua comparação com os padrões que definem os limites das categorias, denominados perfis-padrão ou perfis de referência. Portanto, o estabelecimento das categorias ou classes de risco e de seus perfis de referência reveste-se grande importância.

Continuamente, toma-se perfis  $b_k$  como vetores cujas coordenadas correspondem ao desempenho do perfil em cada um dos quatro critérios propostos no modelo. Tem-se, portanto,  $b_k$  denota o limite inferior da categoria  $C_k$  e o superior da categoria  $C_{k+1}$ . Os perfis  $b_q$  e  $b_0$  correspondem à alternativa ideal e anti-ideal, respectivamente. Considerando-se o conjunto de critérios do modelo, pode-se afirmar que as preferências decrescem com o aumento de valor em cada critério.

Para este estudo, o processo de classificação realizado considerou três categorias de risco, a fim de que ações e níveis de atenção específicos para a mitigação de riscos fossem tomados proporcionalmente ao risco associado a cada categoria. Estas categorias, segundo níveis decrescentes de risco são: Risco Inaceitável ( $C_1$ ), Risco Tolerável ( $C_2$ ) e Risco Aceitável ( $C_3$ ).

A mais alta categoria de risco ( $C_1$ ) envolve risco de componentes com probabilidades mais elevadas de ocorrerem maiores consequências humanas, financeiras, ambientais e operacional. Esta classe demanda ações relativamente urgentes, de forma a requerer uma maior atenção no planejamento da manutenção para se obter uma minimização dos riscos. Por outro lado, a classe mais baixa de risco ( $C_3$ ) comportam componentes do sistema com níveis de risco mais reduzidos, permitindo um tempo de planejamento um pouco maior a fim de que soluções eficazes e com custos satisfatórios sejam encontradas.

### 3.9.1 Alocação dos componentes às categorias de risco

Identificados os perfis de referência, o procedimento de classificação do modelo proposto consiste na confrontação dos riscos de cada componente de acordo com cada critério. Alinhado a isso, a designação do componente ou alternativa  $w_i$  a uma classe se processa através da comparação de  $w_i$  com os perfis de referência  $b_k$ , avaliando-se a veracidade da relação  $w_i \geq b_k$  pelo método multicritério ELECTRE TRI. Segundo o procedimento pessimista, mais utilizado na prática (Dias & Mousseau, 2002), aloca-se o componente  $w_i$  à mais alta categoria  $C_k$  tal que  $w_i$  sobreclassifique  $b_{k-1}$  e seja sobreclassificada por  $b_k$ .

Desta forma, os perfis de referência das classes ( $b_k$ ), que são definidos de acordo com o perfil dos limites indicados em cada alternativa, foi obtido através das Equações (28) e (29):

$$b_{k-1} = g^- + i.k \quad \text{para o limiar inferior} \quad (28)$$

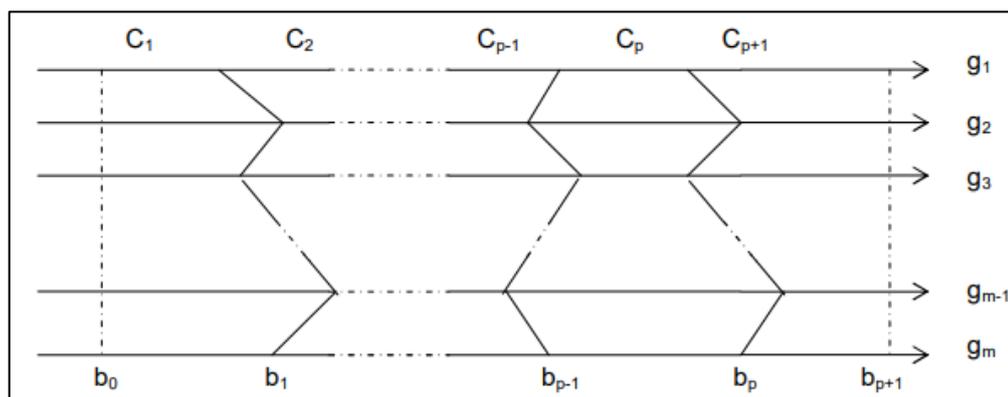
$$b_k = g^+ + i.k \quad \text{para o limiar superior} \quad (29)$$

Onde  $i$  diz respeito ao índice do limiar,  $g^-$  ao valor mínimo dos critérios ( $\min g_{ij}$ ) e  $g^+$  ao valor máximo para cada critério avaliado ( $\max g_{ij}$ ). Por sua vez, o parâmetro  $k$  expresso da seguinte forma:

$$k = \frac{g^+ - g^-}{h} \quad (30)$$

Sendo,  $h$  o número de classes que se deseja alocar as alternativas estudadas. A Figura 9 ilustra a alocação dessas classes, os perfis de referência e os critérios.

Figura 10 - Definição das categorias utilizando os perfis de referência



Fonte: Mousseau et al. (2000)

Adicionalmente, é importante pontuar que qualquer componente com desempenho superior (pior) a  $b_k$  certamente pertencerá a  $C_1$ . Em contrapartida, qualquer componente com desempenho inferior (melhor) a  $b_{k-1}$  será designado à mais baixa categoria de risco.

### 3.9.2 Categorização dos componentes às categorias de risco

A partir da identificação dos perfis de referência se dará o procedimento de classificação, que consiste na confrontação dos riscos de cada componente com as consequências humanas, ambientais, financeiras e operacionais dos perfis das classes através do método ELECTRE TRI. Neste sentido, a designação do componente  $w_i$  a uma classe se dará através da comparação de  $w_i$  com os perfis de referência  $b_k$ , avaliando-se a veracidade da declaração  $aS_{bk}$  pelo método multicritério ELECTRE TRI.

Como resultado, cada componente do sistema complexo recebe uma designação a uma das categorias de risco estabelecidas pelo decisor, com base em uma abordagem não-compensatória de riscos humanos, ambientais, financeiros e operacionais decorrentes de eventos de falha em cada componente.

Assim, a partir desta classificação é possível planejar ações de manutenção mais assertivas de modo a otimizar os recursos disponíveis, afetando diretamente no desempenho das operações.

## **4 APLICAÇÃO DO MODELO MULTICRITÉRIO PARA CLASSIFICAÇÃO DE RISCO EM SISTEMA COMPLEXO**

Este capítulo traz a aplicação do modelo desenvolvido nesse estudo, identificando a o problema a ser aplicado, sistema e software utilizado, bem como, os tipos de processamento e análise de dados realizados. Para realização da classificação de componentes em sistemas complexos foi utilizado o software IRIS (*Interactive Robustness Analysis and Inference for Sorting Problems*) fornecido pelo Instituto de Engenharia de Sistemas e Computadores de Coimbra com metodologia desenvolvida por Dias *et al.* (2002).

Por fim, são apresentados os resultados identificados, bem como a discussão deles. O principal resultado baseia-se na classificação de risco de cada componente do sistema complexo em estudo.

### **4.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA E CONTEXTO OPERACIONAL**

Neste tópico é apresentada uma aplicação do modelo proposto nesta dissertação para classificação dos equipamentos críticos de um Sistema de Alimentação que é considerado um sistema complexo na operação de refino do petróleo. Portanto, o objetivo da aplicação foi ilustrar a metodologia de maneira a identificar e selecionar os componentes deste sistema em categorias de risco e assim, contribuir para a eficácia no planejamento de ações mitigadoras do risco e em uma melhor disponibilidade da planta da refinaria.

#### **4.1.1 Indústria de petróleo e gás**

De acordo com o Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (IBP) o setor de Petróleo e Gás é o 3º no ranking das principais atividades econômicas, impactando outros 5 dos maiores setores, que dependem dele.

Tendo isso em mente, o sistema do setor petrolífero possui uma grande complexidade sendo uma combinação de dutos, válvulas e auxiliares rotativos conectados, como compressores, bombas e seus motores principais (IQBAL *et al.*, 2017). Sendo, portanto, suas operações constituídas basicamente de sistemas multicomponentes.

Diante de tamanha complexidade, manter as ferramentas e equipamentos em boas condições é um desafio, especialmente porque as operações funcionam 24 horas por dia, 7 dias por semana (HAMEL, 2021). Logo, manter e reparar os ativos de maneira a minimizar o *downtime* é um grande desafio para o setor petrolífero, o que pode levar a condições inseguras.

Devido à complexidade e o alto custo dos ativos no setor petrolífero, segundo Khalifa *et al.* (2015) é crucial aplicar as tomadas de decisões sobre manutenção e substituição de equipamentos. Nesta perspectiva, Patra & Asati (2021) afirmam que, cada vez mais, a indústria do petróleo direcionará seus esforços para acessibilidade e aumento da disponibilidade de suas operações, ao mesmo tempo que adota a descarbonização e a digitalização. Sendo, portanto, uma forma de aumentar o valor agregado do setor e minimizar os custos das operações.

Isso se deve porque os acidentes geram fatores negativos para o ponto de vista social e econômico para as empresas e os acionistas que investem nessa área, segundo Andrade (2005) os acidentes catastróficos nesse setor foram: *Flixborough*, *Piper Alpha*, *Exxon Valdez*, Plataforma P36 e plataforma da empresa *British Petroleum* no Golfo do México.

Alinhado a isto, a ocorrência de acidentes industriais no setor petrolífero alertou diferentes áreas econômicas sobre as perdas e as consequências. Consequentemente, devido ao impacto do risco nas operações, as regulamentações estão cada vez mais rigorosas quanto à mitigação dos riscos nas indústrias petrolíferas. À vista disso, Khan & Haddara (2004) pontua que no setor petrolífero a avaliação da condição e probabilidade de falha são os fatores mais importantes que influenciam no processo de tomada de decisão para uma aplicação efetiva das políticas de manutenção.

Deste modo, a gestão da análise de falhas tem uma importância estratégica dentro de uma indústria de petróleo que beneficia todos os setores, do ponto de vista da organização, engenharia e econômico (BERTOLINI *et al.*, 2009).

Vale ressaltar, que uma tomada de decisão mais efetiva é crucial no setor petrolífero, pois este possui sistemas complexos devido ao fato que, embora o petróleo seja uma das fontes de energia mais utilizadas no mundo, no estado em que é obtido, óleo cru, não possui muitas aplicações. Logo, para que seu potencial energético seja explorado, ele passa por diversas operações que constituem o chamado refino de petróleo.

#### 4.1.1.1 Refinaria

Farias (2010) discorre em seu estudo que o processo de refino tem por intuito separar as frações do petróleo e processá-las, transformando-as em produtos de maior valor e utilidade. Logo, o refino do petróleo integra uma série de operações físicas e químicas que garantem o aproveitamento do seu potencial energético através da geração dos produtos fracionados derivados, de composição e propriedades físico-químicas determinadas.

Assim, para que se tenha o pleno aproveitamento do potencial de utilização do petróleo, torna-se mandatário um cuidadoso planejamento das operações industriais requeridas para o refino do petróleo, que diz respeito à transformação de moléculas de baixo valor de venda em outras de mercado mais vasto e rentável (BIONDI, 2016).

De acordo com a base de dados a eMars (*Major Accident Reporting System*) os maiores acidentes dos últimos 20 anos, dos 777 acidentes, comunicados a Comissão Europeia, ocorridos em indústria química, cerca de 21% ocorreram no setor de petróleo, mais especificamente nas refinarias.

As refinarias são projetadas, em sua maioria, para processar petróleo pesado na faixa de 15 a 23° API, logo, o projeto prevê as seguintes unidades: Unidade de Destilação Atmosférica (UDA), Unidade de Coqueamento Retardado (UCR), Unidades de Hidrotratamento de Diesel (HDT/DIESEL) e Nafta (HDT/NAFTA), Unidade de Geração de Hidrogênio (UGH). Portanto, o projeto de uma refinaria é composto por um sistema com muitas partes que interagem entre si e com o meio ambiente. A existência de algumas interações é familiar, outras não são visíveis ou não são compreendidas de imediato, podendo resultar em uma sequência de eventos que poderá conduzir a um acidente.

Portanto, a otimização individual das unidades deve englobar a identificação e a minimização dos desperdícios que ocorrem durante a operação. Segundo Hallale *et al.* (2003), estima-se que cerca de U\$1 milhão/ano sejam perdidos devido a desperdícios causados, por exemplo, por válvulas abertas na linha para o *flare* e para reatores vazios, por *by-pass* na linha de alimentação para unidades de recuperação de GLP, por compressão de hidrogênio seguida de descarte, dentre outras situações ineficientes.

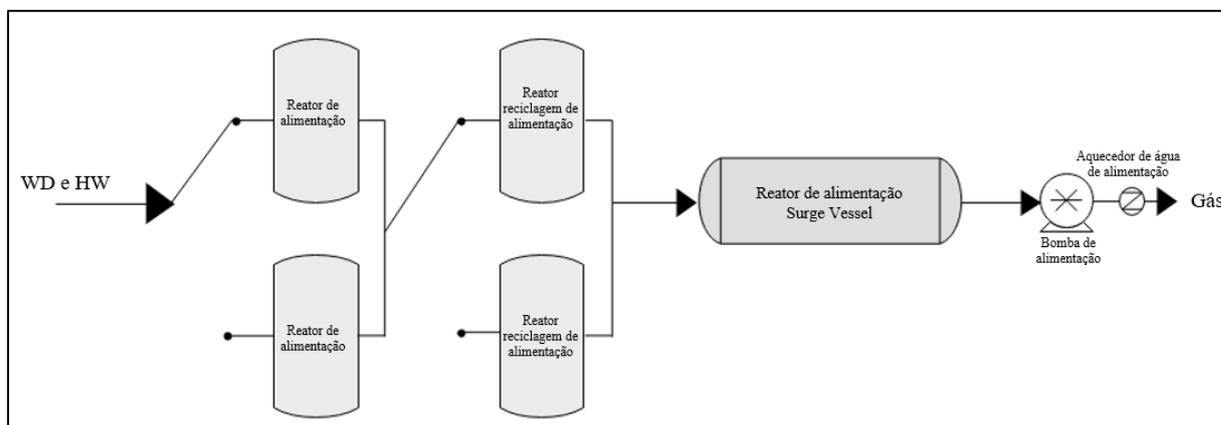
#### 4.1.2 Caracterização do Sistema

As unidades de refinaria são complexas instalações, que processam produtos em uma série de especificações variadas. As refinarias são projetadas e aprimoradas para processar o petróleo e obter diversos derivados, tais como: gasolina, óleo combustível, óleos lubrificantes, jato/condensados, solventes, diesel, asfalto, coque e gases/GLP (gás liquefeito de petróleo).

Neste sentido, o produto da refinaria passa por uma cadeia de unidade operacionais conectadas. Essas unidades se relacionam uma à outra de forma que, se uma unidade ou grupo de unidades estão em manutenção, as outras serão afetadas completamente ou parcialmente. Conseqüentemente, o planejamento da manutenção costuma ser uma alta prioridade para as unidades de refinaria.

Posto isto, a unidade Hidrocraqueamento (*Hydrocracker*) que tem por objetivo converter destilados de vácuo em destilados intermediários de elevada qualidade, a partir da quebra da cadeia de hidrocarbonetos. Essa quebra, ocorre espontaneamente em reatores no sistema de alimentação apresentado no diagrama de fluxo na Figura 11.

Figura 11 - Diagrama de fluxo sistema de alimentação



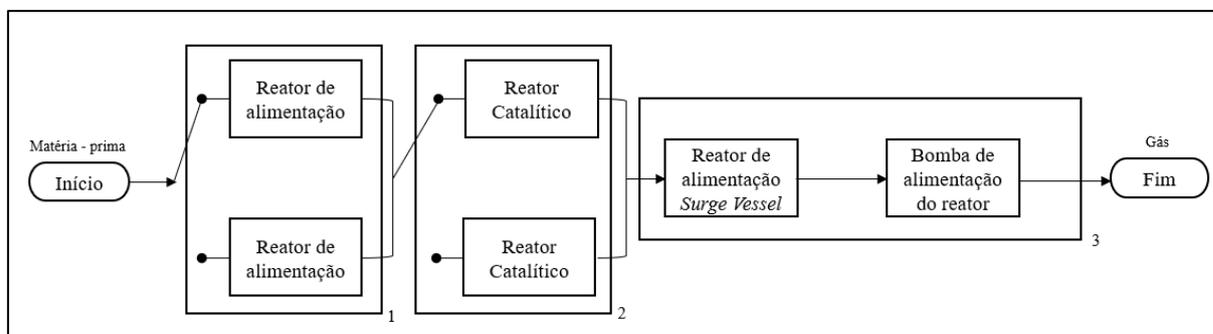
Fonte: a autora, 2022

A escolha do sistema de alimentação para a análise é baseada no quão crítico este é para a unidade de refinaria. A Figura 11 apresenta as operações neste sistema, que recebem as matérias-primas: n-decano (WD) e *Hydrowax* (HW).

A estrutura desse sistema segue uma organização em série-paralelo, como apresentado pela Figura 12, com o equipamento reserva em *standby*. Devido a isso, esse processo envolve inúmeros fatores complexos e inter-relacionados, de maneira

que uma vez que os defeitos quando não detectado e eliminado a tempo, poderá trazer grandes perdas para o sistema.

Figura 12 - Diagrama de bloco sistema de alimentação

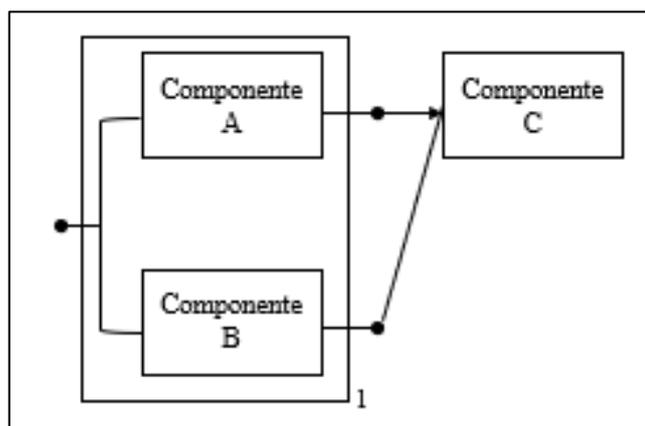


Fonte: Adaptado Nakamanuruck *et al.*, 2017

Conforme a Figura 12, a estrutura do sistema contém equipamentos de redundância com o objetivo de prevenir a falha total, já que o sistema duplicado garante a continuidade do processo quando houver alguma indisponibilidade ou intermitência em uma das réplicas. Dessa forma, no sistema em série-paralelo, a falha de um subsistema, neste caso 1, 2 e 3, pode causar a perda de toda a capacidade do sistema, enquanto a falha de um componente pode causar a perda de uma parte da capacidade do sistema. Em outras palavras, diferentes modos de falha impactam de maneira distinta a capacidade de todo o sistema.

De forma detalhada, o sistema em *standby* foi projetado para quando um componente falhar, o componente em *standby* funcione no lugar. Portanto, o subsistema em paralelo tem a mesma função, usando um componente para substituir o outro em caso de falha, colocando-o em *standby*. Deste modo, como apresentado na Figura 13, a troca de um componente para outro é automática para que o sistema continue operando e não tenha danos no processo. Por exemplo, o componente C só funcionará quando os componentes A ou B funcionam.

Figura 13 - Modelo do sistema standby



Fonte: Adaptado Nakamanuruck *et al.*, 2017

Posto isto, o sistema poderá falhar em três casos: (1) Parte A avariada, Parte B funciona, porém o interruptor (*switch*) está danificado levando o sistema a falha; (2) Componente A funciona, Componente B avariado, o interruptor (*switch*) para a troca está danificado, logo, o sistema falha; (3) Tanto a Parte A quanto a B se apresentam avariadas tendo como consequência a falha do sistema.

#### 4.1.2.1 Enumeração das Falhas dos Componentes

Como no Brasil não há um conjunto suficiente de dados históricos, sobre a ocorrência de acidentes em refinarias, a estimativa das probabilidades de falha em refinarias fica geralmente atrelada aos bancos de dados de outros países. Consequentemente, buscando uma melhor compreensão acerca dos acidentes no setor petroquímico, para avaliar as falhas foi utilizado os relatórios disponibilizados nas bases de dados apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Fontes de relatórios de acidentes analisadas neste estudo

Fonte	Informações
eMars ( <i>Major Accident Reporting System</i> );	Acidentes relatados à Comissão Europeia em conformidade com a Diretiva Seveso, Anexo VI critério
ARIA (França) ( <i>Analysis, Research and Information on Accidents</i> )	Um banco de dados operado pela lista do Ministério da Ecologia, Energia e Desenvolvimento Sustentável da França apresentando os eventos acidentais que afetaram ou poderiam ter prejudicados a saúde ou a segurança pública, a agricultura, natureza ou meio ambiente.
U.S. Chemical Safety Board (CSB)	A CSB é uma agência federal independente do governo dos Estados Unidos encarregada de investigar acidentes químicos industriais

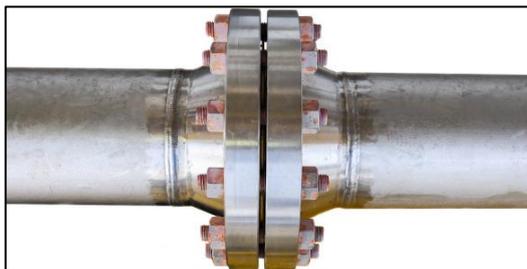
Fonte: a autora, 2022

Portanto, de acordo com a análise dos históricos acidentais apresentados nos bancos de dados, haverá falha do sistema quando não houver ao menos um caminho que conecte a origem com a saída sem que haja retorno, ou seja, quando algum subsistema falhar em aberto (todos seus componentes falharem em aberto) ou em caso de o subsistema falhar em curto (ao menos um componente falhar em curto).

Neste sentido, as bases acima elencadas foram utilizadas para a realização de avaliações estatísticas com o propósito de, através de frequências, estimar a taxa  $\lambda$  de ocorrência de falhas em um período dos cenários de incertezas relacionados as consequências das falhas.

Alinhado a isto, devido a exposição a longo prazo dos componentes do sistema a substâncias como hidrogênio e hidrocarbonetos é comum que o estado físico se deteriore ao longo do tempo, devido a fatores como: corrosão, desgaste/fadiga dos elementos e acúmulo das substâncias. Devido o sistema ser todo conectado através de tubulações, as instalações possuem uma grande quantidade de válvulas conectadas por flange de maneira a suportar a pressão do processo, porém, com o passar do tempo esses flanges costumam apresentar um desgaste, que é um dos maiores fatores que levam a falha.

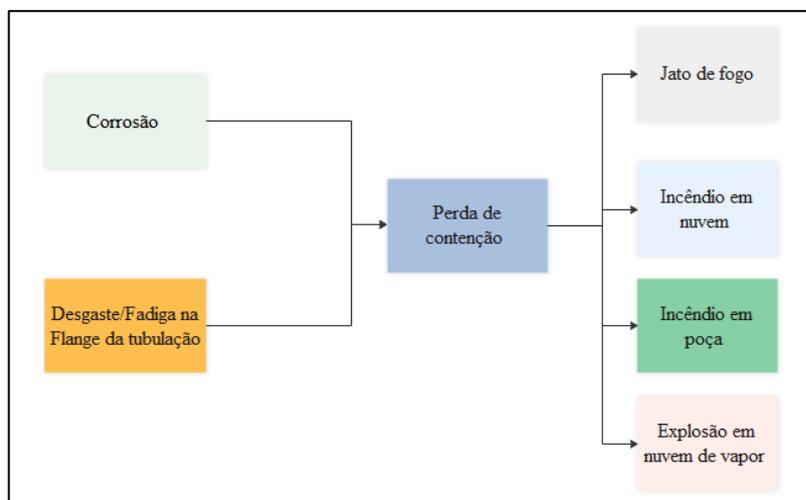
Figura 14 - Flange localizada na tubulação do sistema de alimentação



Fonte: a autora, 2022

Diante do exposto, esses fatores irão, eventualmente, ocasionar fissuras acarretando rupturas que provocam vazamentos, sendo estes uma das maiores causas de acidentes. Sobre esse processo, a literatura de Casal (2017), TNO (2005) e CCPS (2010a, 2010b), descrevem os seguintes efeitos: Jato de fogo (*jet fire*), Incêndio em Nuvem (*flash fire*), Incêndio em Poça (*pool fire*) e Explosão em Nuvem de Vapor (*Vapor Cloud Explosion*). A Figura 15 ilustra as duas causas potenciais associadas aos acidentes relatados nas bases de dados analisadas.

Figura 15 - Ilustração do processo de um acidente



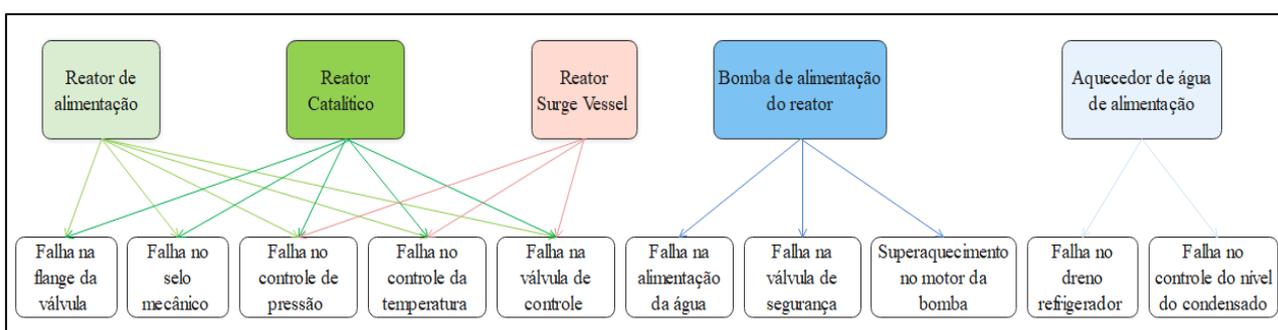
Fonte: a autora, 2022

Adicionalmente, uma forma de fragilização por hidrogênio, que acarreta o desgaste, ocorre por meio de reação química, a substância reage com um ou mais elementos das paredes metálicas e em altas temperaturas, para formar hidretos que enfraquecem a estrutura de rede do material. No caso das refinarias de petróleo,

quando esse efeito acontece, a perda de contenção de gás é a primeira etapa na escala para a detonação do incêndio.

Levando em consideração o sistema de alimentação da refinaria, a Figura 16 apresenta as principais falhas associadas a cada componente. Os dados das falhas foram obtidos através dos bancos de dados citados anteriormente de maneira a proporcionar uma estimativa conservadora de probabilidade dessas falhas.

Figura 16 - Falhas associadas aos componentes do sistema de alimentação



Fonte: a autora, 2022

Carretero *et al.* (2003) pontuam que sabendo as possíveis falhas do sistema é possível analisar os efeitos destas e assim, construir estratégias de decisões relacionadas a manutenção. Isso se deve porque, atrelado a manutenção está o gerenciamento e avaliação de riscos que podem ser constatadas diferentes naturezas de possíveis consequências acidentais, tais como danos à vegetação e ao meio ambiente, perdas econômicas e ferimentos em seres humanos além de paradas de produção.

Consequentemente, para um efetivo planejamento da manutenção, devem ser identificados os componentes remanescentes com altas taxas de falha, se existirem, para planejamento de ações que irão mitigar os riscos. Isso se deve porque se um subsistema não crítico for considerado para análise, então tempo e recursos serão gastos sem necessidade. Assim como se um subsistema crítico não for considerado, os prejuízos para a organização e para a sociedade tenderão a ser grandes. Portanto é necessário o desenvolvimento de métodos sistemáticos para a determinação de tais componentes, principalmente se for levada em conta a crescente complexidade de configurações dos sistemas atualmente produzidos.

## 4.2 APLICAÇÃO NUMÉRICA

Com o objetivo de ilustrar o modelo de decisão multicritério proposto para a análise de riscos em um sistema complexo, uma aplicação numérica é apresentada. Neste sentido, este estudo apresenta uma situação definida pela distribuição sistema de alimentação de uma refinaria, como caracterizado anteriormente.

Adicionalmente, deve-se notar, como sugerem Hokstad & Steiro (2006), que a abordagem proposta neste modelo não “mistura” diferentes categorias de perdas em uma única medida de perda total esperada, ou seja, em uma única métrica de risco. Tal combinação certamente abriria espaços para controvérsias, permitindo que as informações relevantes fossem perdidas nas análises e discussões subsequentes do processo de avaliação dos riscos (HOKSTAD & STEIRO, 2006).

O modelo busca fornecer subsídios para que, satisfeitos os critérios, os gestores de manutenção possam, em um processo continuado e periódico, proceder à identificação e classificação dos componentes em um sistema em operação em categorias hierárquicas de risco.

Um processo sistemático de avaliação qualitativa e/ou quantitativa é necessário para identificar e classificar as situações e cenários de acordo com sua gradação de riscos. Em alguns casos, torna-se bastante interessante utilizar o princípio ALARP (*As Low as Reasonably Practicable*) que classifica riscos em três categorias: risco negligenciável, risco tolerável e risco inaceitável. Desta forma, é possível classificar as situações e cenários de acordo com a sua graduação de risco de maneira a alcançar um equilíbrio entre os custos, dificuldade, e momento da aplicação das medidas de redução de risco e os benefícios reais percebidos.

Portanto, buscando classificar em categorias de risco um conjunto de componentes em operação, parte-se para o cálculo das perdas esperadas (riscos) sob a abordagem do modelo proposto. Integrando as perdas obtidas a partir de funções parametrizadas para a posteriori, obter a classificação dos componentes de acordo com o risco.

Desta forma, os dois perfis de referência de classe que dividiram as três categorias de risco foram calculados como apresentado na última seção do Capítulo 3 e, estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Utilidades esperadas associadas aos perfis de referência da classe

PERFIS	$E[U_h(w_i)]$	$E[U_a(w_i)]$	$E[U_s(w_i)]$	$E[U_e(w_i)]$
$b_k'$ - distingue Risco Inaceitável ( $C_1$ ) de Risco Tolerável ( $C_2$ )	0,503	0,288	0,424	0,125
$b_k''$ - distingue Risco Tolerável ( $C_2$ ) de Risco Aceitável ( $C_3$ )	0,630	0,398	0,684	0,179

Fonte: a autora, 2022

A Tabela 2 em um primeiro olhar pode não ser clara, dado que as diferenças entre as utilidades esperadas para os perfis são mínimas. Porém, deve-se levar em conta que as utilidades esperadas correspondem a perdas. Sendo, cada perda associada a um componente e um cenário em uma dada consequência correspondente a distribuição  $P(c | \theta, w_i)$  para cada uma das consequências estudadas.

Dessa forma, estando as utilidades em uma escala de 0 a 1, quanto mais próximo o valor da utilidade esperada estiver de 1, mais seguro é o componente considerando a respectiva consequência analisada.

#### 4.2.1 Definição das alternativas

O desempenho das operações em um sistema produtivo está diretamente ligado ao nível de manutenção em seus componentes. Deste modo, para que o planejamento da manutenção seja efetivo é preciso definir técnicas, como periodicidade das intervenções, qualidade da manutenção e principalmente a determinação dos equipamentos e componentes que impactam de maneira significativa no funcionamento das funções básicas do sistema.

Portanto, apesar de ser complexa a definição da criticidade dos componentes em um sistema é de suma importância para a alocação dos recursos de manutenção de forma adequada. Pois, apenas um componente, situado em uma posição de fragilidade para o sistema, pode desencadear uma falha e afetar o sistema como um todo. Logo, a criticidade de um processo produtivo define a importância de todos os componentes que compõem este processo, em vários níveis hierárquicos.

Ademais, abordar o sistema ao nível do componente restringiria o modelo e o processo de decisão sobre o sistema, ou em outro extremo, abordar toda a planta em uma só vez, demandaria muito tempo e aumentaria a complexidade do processo de decisão em razão do número de componentes/equipamentos analisados.

Alinhado a isso, é importante estabelecer o sistema que será estudado e o nível de profundidade da análise, logo, todos os componentes que compõem o conjunto de definições devem ser incluídos na matriz de avaliação. É importante ressaltar, que mesmo componentes simples do ponto de vista técnico podem apresentar criticidade elevada, quando avaliados sob uma visão de conjunto do sistema.

Dessa forma, o conjunto de alternativas para esse estudo são os componentes do sistema base. Roy (1985) pontua que denotamos o conjunto de alternativas no ELECTRE TRI ( $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ ) de maneira que o método irá atribuir para cada alternativa categorias ordenadas de acordo com o valor dos limites de referência predefinidos.

Ao todo o sistema de alimentação possui sete componentes, que estão configurados em serie-paralelo como apresentado no início deste capítulo. A Tabela 3 a seguir apresenta cada um desses componentes que serão as alternativas para aplicação do ELECTRE TRI.

Tabela 3 - Conjunto de componentes a serem classificados

<b>COMPONENTES</b>
Reator de alimentação (A)
Reator de alimentação (B)
Reator reciclagem de alimentação (A)
Reator reciclagem de alimentação (B)
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>
Bomba de alimentação
Aquecedor de água de alimentação

Fonte: a autora, 2022

A probabilidade das consequências na dimensão humana foi calculada a partir das equações apresentadas no Capítulo 3, levando em consideração dados históricos dos bancos de dados para o cálculo do tempo de exposição “t” e, para o “x” foi considerado um número máximo de cinco pessoas expostas.

Para as consequências ambientais por meio dos bancos de dados foi possível obter qual a área média que poderá ser atingida caso ocorra uma falha, os dados estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da área atingida para cada componente do sistema

<b>Componentes</b>	<b>Área atingida (m<sup>2</sup>)</b>
Reator de alimentação (A)	3
Reator de alimentação (B)	3
Reator reciclagem de alimentação (A)	2
Reator reciclagem de alimentação (B)	2
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>	5
Bomba de alimentação	1
Aquecedor de água de alimentação	0

Fonte: eMars e ARIA, 2021

Nessa perspectiva, seguindo a mesma lógica para avaliar a função consequência operacional informações de banco de dados foram utilizadas de maneira a estimar o tempo de inatividade que cada componente do sistema está sujeito. Portanto, para o comportamento do *downtime* foram considerados os dados apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores do downtime área atingida para cada componente do sistema

<b>Componentes</b>	<b>Downtime (horas)</b>
Reator de alimentação (A)	1,91
Reator de alimentação (B)	1,21
Reator reciclagem de alimentação (A)	1,59
Reator reciclagem de alimentação (B)	1,78
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>	3,04
Bomba de alimentação	3,79
Aquecedor de água de alimentação	2,63

Fonte: eMars e ARIA, 2021

Diante dessa perspectiva, a análise do número de eventos de falha é realizada levando em consideração a taxa de falha de cada componente do sistema, apresentada pela Tabela 6, abaixo.

Tabela 6 - Valores da taxa de falha para cada componente do sistema

<b>Componentes</b>	<b>Taxa de falha (falha/ano)</b>
Reator de alimentação (A)	3,68
Reator de alimentação (B)	0,356
Reator reciclagem de alimentação (A)	0,712
Reator reciclagem de alimentação (B)	1,068
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>	0,36
Bomba de alimentação	0,237
Aquecedor de água de alimentação	0,593

Fonte: eMars e ARIA, 2021

Essas taxas de falhas foram obtidas a partir dos bancos de dados citados anteriormente. Deste modo, esses valores estão associados ao tempo de operação do sistema em refinarias petrolíferas.

É coerente afirmar que, por se tratar de um sistema em série-paralelo com alguns componentes em *stand-by*, os reatores de Alimentação (A) apresentam uma taxa de falha maior se comparada com o (B), que fica em “em espera” caso aja alguma emergência. De forma geral, os reatores em *stand-by* ficam à disposição para que os ativos (no caso os reatores A), em caso de falha, voltem a operar com mais rapidez sem impactar no sistema como um todo.

Adicionalmente, importante ressaltar que os dados de falha resultados pelos bancos de dados devem ser utilizados com bastante cuidado, pois diversos fatores podem influenciar nas taxas de falha, tais como, os tipos de falhas, características dos sistemas envolvidos, condições ambientais, tipos de operações envolvidas, existência de normas dos procedimentos operacionais, entre outros.

Por consequência, cada componente será analisado critério a critério considerando seu risco, avaliado por meio da utilidade esperada. Através dessa análise se torna possível alcançar as classes de risco de cada um desses componentes por critério.

#### 4.2.2 Utilidade Esperada

Ferreira *et al.* (2009) pontua que a função utilidade representa um indicador que combina as dimensões da consequência num índice de desejabilidade. No contexto desta dissertação, para cada dimensão foi realizado o cálculo da utilidade esperada de acordo com o componente “*i*” do sistema base em função do domínio das consequências.

Esta função é estimada através da metodologia com base na estrutura axiomática da teoria da utilidade que permite a avaliação probabilística das consequências diante da incerteza, apresentada no Capítulo 3. Os valores apresentados nas tabelas ao longo desse tópico foram obtidos através das equações (26), para a dimensão humana, e equação (27) para as demais dimensões.

Alinhado a isso, Keeney e Raiffa (1976) endossam que se uma utilidade esperada é atribuída para cada consequência possível e a utilidade esperada é calculada, tem-se como o melhor curso de ação a alternativa com a maior utilidade esperada.

Deste modo, a primeira consequência analisada é a dimensão humana. Avalia-se, portanto, o número de pessoas atingidas pela ocorrência de cada evento de falha, os valores da utilidade esperada  $E[U_h(w_i)]$  são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valores da utilidade esperada para a dimensão humana

Componentes	$E[U_h(w_i)]$
Reator de alimentação (A)	0,377
Reator de alimentação (B)	0,884
Reator reciclagem de alimentação (A)	0,863
Reator reciclagem de alimentação (B)	0,579
Reator de alimentação Surge Vessel	0,462
Bomba de alimentação	0,869
Aquecedor de água de alimentação	0,614

Fonte: a autora, 2022

Por sua vez, a dimensão ambiental foi avaliada levando em consideração a probabilidade uma área ser afetada devido a falha de cada um dos componentes do

sistema base estudado. A Tabela 8 apresenta para esta dimensão a utilidade esperada.

Tabela 8 - Valores da utilidade esperada para a dimensão ambiental

Componentes	$E[U_a(w_i)]$
Reator de alimentação (A)	0,178
Reator de alimentação (B)	0,250
Reator reciclagem de alimentação (A)	0,415
Reator reciclagem de alimentação (B)	0,508
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>	0,251
Bomba de alimentação	0,469
Aquecedor de água de alimentação	0,365

Fonte: a autora, 2022

Já para o caso da dimensão financeira (s) é considerada analisando os prejuízos monetários consequentes das falhas ocorridas. Verifica-se, na Tabela 9 os valores da utilidade esperada para esta dimensão.

Tabela 9 - Valores da utilidade esperada para a dimensão financeira

Componentes	$E[U_s(w_i)]$
Reator de alimentação (A)	0,165
Reator de alimentação (B)	0,228
Reator reciclagem de alimentação (A)	0,367
Reator reciclagem de alimentação (B)	0,455
Reator de alimentação <i>Surge Vessel</i>	0,228
Bomba de alimentação	0,944
Aquecedor de água de alimentação	0,328

Fonte: a autora, 2022

E, finalmente, a dimensão operacional verifica como a falha afeta o processo produtivo. O *downtime* é utilizado para estimar as consequências. O valor da utilidade esperada, para cada componente, é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Valores da utilidade esperada para a dimensão operacional

Componentes	$E[U_e(w_i)]$
Reator de alimentação (A)	0,072
Reator de alimentação (B)	0,148
Reator reciclagem de alimentação (A)	0,212
Reator reciclagem de alimentação (B)	0,232
Reator de alimentação Surge Vessel	0,148
Bomba de alimentação	0,110
Aquecedor de água de alimentação	0,199

Fonte: a autora, 2022

### 4.3 APLICAÇÃO DO ELECTRE TRI

O IRIS (*Interactive Robustness Analysis and Inference for Sorting Problems*) é um Software de Apoio à Decisão desenvolvido para resolver problema com base na variante pessimista do método ELECTRE TRI.

A análise de robustez considera todos os resultados compatíveis com todos as combinações aceitáveis dos valores para os parâmetros. Roy (1998) apresentou em seu estudo a conclusão que define uma análise robusta, que diz respeito, a uma premissa formalizada que é verdadeira para todas essas combinações. Essa definição contrasta com a análise de sensibilidade tradicional, realizada após a obtenção de um resultado, que determina o quanto cada parâmetro pode variar sem levar a um resultado diferente. Embora útil em muitas circunstâncias, como apresentado por Henggeler, Antunes e Clímaco (1992) a análise de sensibilidade requer um valor inicial para cada parâmetro (*i.e.*, onde o consenso seria necessário) e se concentra no primeiro resultado encontrado, ignorando, portanto, outras conclusões que poderiam ter sido alcançadas de outra forma.

Segundo Keeney e Raiffa (1976), a escala intervalar da função utilidade permite a comparação dos incrementos de risco de acordo com cada consequência. Como apresentado acima, o processo de determinação do valor da utilidade esperada leva em consideração escolhas entre as consequências (*i.e.*, consequências devido a acidentes em refinarias de petróleo) e loterias com probabilidades específicas entre o melhor e o pior caso.

Neste sentido, a partir dos valores da utilidade esperada de cada um dos componentes para as diferentes consequências foi realizada a aplicação desses dados no software IRIS de maneira a obter a classificação dos componentes nas categorias de risco definidas anteriormente.

No contexto do ELECTRE TRI, é interessante saber a gama de categorias onde uma ação pode estar atribuída, logo, a análise de sensibilidade, é frequentemente realizada mudando um único parâmetro de cada vez, ignorando assim, possíveis interdependências entre nos parâmetros. Alinhado a isso, foram obtidos os seguintes resultados apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Resultado da classificação dos componentes do sistema base

	C1	C2	C3
Componente 1	Dark Green		
Componente 2	Dark Green	Light Green	
Componente 3	Light Green	Dark Green	Light Green
Componente 4		Dark Green	
Componente 5	Dark Green		
Componente 6	Dark Green	Black	Light Green
Componente 7	Light Green	Dark Green	

lambda	k1	k2	k3	k4
0.8625	0.6375	0.0375	0.1375	0.1875

Fonte: a autora, 2022

A página dos Resultados do IRIS usa cores para indicar o intervalo de atribuições possíveis para cada ação, apresentando assim, uma análise de sensibilidade diretamente. Em outras palavras, as cores indicam as categorias onde cada componente pode ser atribuído sem violar as restrições e limiares de preferência definidos previamente. O tom mais escuro de verde indica a categoria recomendada pelo *software* para o componente, com base nos parâmetros inseridos previamente.

Através da classificação obtida por meio do *software* podemos realizar uma análise sobre os componentes do sistema estudado. Pode-se observar que, a

despite do decisor simulado não ter apresentado um valor preciso para o limiar de corte e os respectivos pesos de cada dimensão, o *IRIS (Interactive Robustness Analysis and Inference for Sorting)*, obteve uma solução robusta e única para os componentes avaliados, dentro das restrições fornecidas pelo decisor como *input* do programa. Diante destas restrições, para cada o estudo a Tabela 11 apresenta a classificação para os 7 componentes do sistema base.

Tabela 11 - Classificação obtida para os componentes do sistema de alimentação

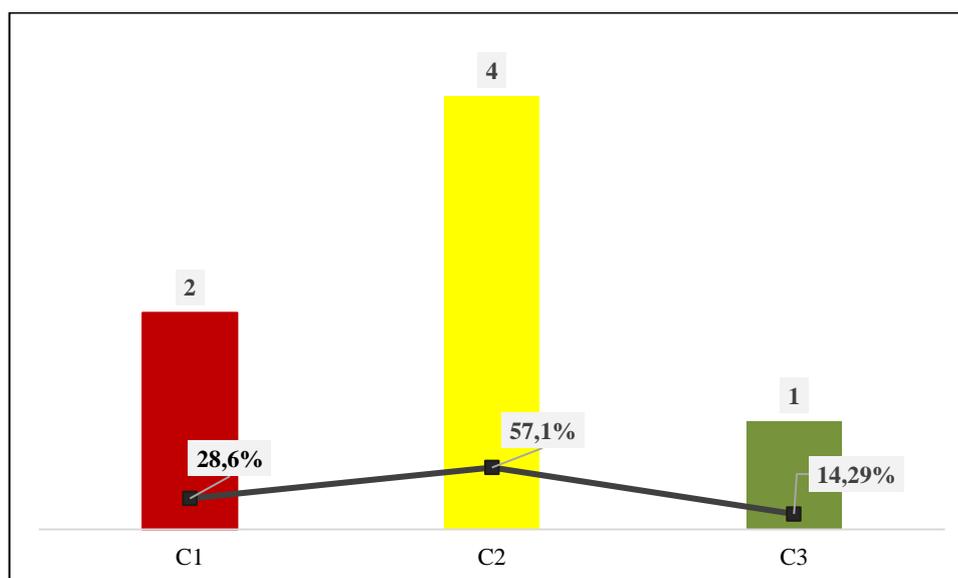
<b>Componente</b>	<b>Perspectiva Multicritério</b>
Reator de alimentação (A)	<b>Risco Inaceitável</b>
Reator de alimentação (B)	<b>Risco Tolerável</b>
Reator reciclagem de alimentação (A)	<b>Risco Tolerável</b>
Reator reciclagem de alimentação (B)	<b>Risco Tolerável</b>
Reator de alimentação Surge Vessel	<b>Risco Inaceitável</b>
Bomba de alimentação	<b>Risco Aceitável</b>
Aquecedor de água de alimentação	<b>Risco Tolerável</b>

Fonte: a autora, 2022

#### 4.4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base na classificação obtida através desta análise é possível definir quais as ações devem ser contempladas com investimentos de recursos disponíveis. Ademais, é possível observar que todas as alternativas (componentes) avaliados estão enquadradas em uma das três categorias que foram estabelecidas. Posto isto, ao analisar a Figura 17 verifica-se que 28,6% dos equipamentos estão classificados no Risco Inaceitável (C<sub>1</sub>). Logo, esses componentes possuem alta periculosidade.

Figura 17 - Análise do quantitativo de cada classe

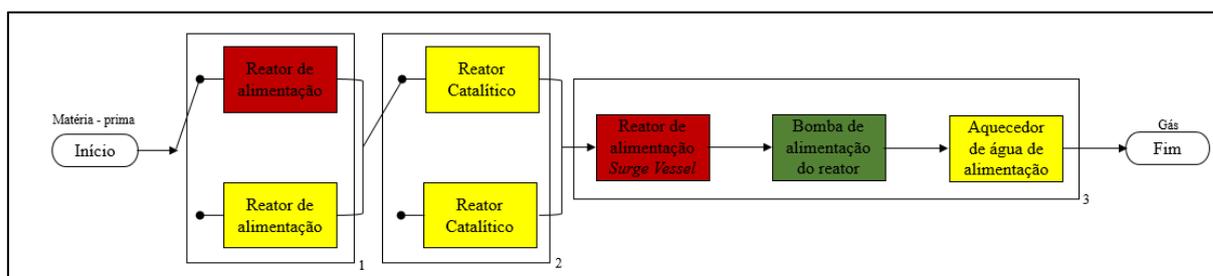


Fonte: a autora, 2022

De forma detalhada, o Reator de Alimentação A e o Reator de Alimentação *Surge Vessel* pertencem à categoria constituída por componentes com alto risco, sendo, portanto, o Risco Inaceitável (C<sub>1</sub>). Já a bomba de alimentação foi o único componente do sistema que apresentou o Risco Aceitável (C<sub>3</sub>). Os demais componentes (57,1%) foram classificados dentro da categoria de Risco Tolerável (C<sub>2</sub>) que é formada por componentes de prioridade moderada.

À vista disso, a Figura 19 apresenta uma visualização da classificação dos componentes de acordo com a sua estrutura no sistema estudado. Verifica-se que os componentes classificados como Risco Inaceitável estão na parte chave do sistema, são, portanto, componentes mais críticos que necessitam de um planejamento de manutenção mais rígido a fim de garantir uma maior redução do risco de falhas.

Figura 19 - Esquema da classificação dos componentes



Fonte: a autora, 2022

Para o nível de corte de  $\lambda = 0,75$  todas as alternativas analisadas apresentaram convergência. Logo, não foi verificado nenhuma divergência na atribuição pessimista das alternativas. Vale ressaltar que não houve relações de incomparabilidade na comparação com os perfis das categorias, apesar do nível de corte ser exigente.

Assim sendo, a metodologia apresentada agrega uma abordagem de riscos fundamentada na Teoria da Utilidade para avaliação dos riscos em cada uma de suas dimensões, utilizando o método ELECTRE TRI para avaliação entre as dimensões. Desta forma, apresentou que é possível designar para cada componente de um sistema uma hierarquia de risco com base nas dimensões de impactos humanos, ambientais, financeiros e operacionais decorrentes de falhas em um sistema complexo.

O resultado da aplicação permite traçar uma estratégia de manutenção focada no controle e planejamento de ações sistêmicas com resultado a longo prazo, visto que grande parte das alternativas possuem criticidade alta ou média. Para os equipamentos avaliados com uma criticidade alta, ou seja, os de risco inaceitável, a estratégia é a ação imediata voltada para melhorias focadas em reduzir o impacto de sua falha em aspectos como segurança e disponibilidade da operação. Já para os equipamentos de média criticidade, isto é, de risco tolerável a atuação da manutenção deve ser priorizada em razão da ordenação dos equipamentos, com uma mescla de ações imediatas e sistêmicas.

Tais resultados apontam uma consistência para o sistema estudado, pois os componentes que são os classificados na categoria de risco inaceitável tem o maior impacto no sistema. Isso se deve provavelmente devido a ocorrência de falhas inesperadas e dispendiosas que podem ocorrer como resultado de corrosão ou fadiga. As altas taxas de corrosão podem, potencialmente, resultar em danos estruturais, podendo ter consequências desastrosas.

O Reator de Alimentação (A) lida diretamente com as matérias primas que são oxidantes e podem causar desgaste severo, principalmente, no flange da válvula, ocasionando corrosão ou fadiga. Por isso, este componente merece uma maior atenção sendo assim, classificado como Risco Inaceitável ( $C_1$ ).

Por sua vez, o Reator de alimentação *Surge Vessel* também classificado como Risco Inaceitável ( $C_1$ ), principalmente, devido a arquitetura do sistema. Isto é, este componente está em série com os demais, logo, se ele vier a falhar, impacta em toda a operação do sistema, podendo causar a parada do Sistema de Alimentação.

Além disso, uma vez que é possível identificar quais componentes são mais críticos para o sistema as empresas podem elaborar estratégias que direcionem e focalizem os recursos utilizados, tanto no quesito financeiro, como humano, operacional e ambiental, em busca de um melhor desempenho dos sistemas complexos através de uma maior segurança dos componentes.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo traz as conclusões do presente estudo, ressaltando de forma concisa os principais pontos e resultados encontrados, assim como as limitações e dificuldades enfrentadas no andamento da pesquisa. Além disso, apresenta sugestões para trabalhos futuros que podem dar continuidade à exploração do tema abordado.

### 5.1 CONCLUSÕES

O modelo de decisão estruturado nesta dissertação foi construído para a avaliação das consequências/impactos das falhas obtidas tendo como base as metodologias para a análise de criticidade. O impacto deste modelo pode ser verificado a partir da incorporação da avaliação multicritério na análise de risco, sendo esta subdividida em: análise da probabilidade de falha, avaliação das consequências e quantificação do risco. Esta incorporação tem por intuito tratar as incertezas através de uma abordagem quantitativa, de forma não compensatória.

Neste sentido, esta dissertação se apresenta como uma inovação no processo de gerenciamento de riscos para sistemas complexos. Adicionalmente, o estudo de caso tem por motivação o fato de que a refinaria é de suma importância para a obtenção dos derivados de petróleo que, cada vez mais, vem ganhando a atenção devido à complexidade do processo.

Além do mais, na indústria de petróleo e gás, os requisitos de segurança, meio ambiente e saúde (SMS) estão cada vez mais exigentes, além do crescente rigor na legislação ambiental, depois de vazamentos *offshore* ocorridos em período recente.

Portanto, o modelo é adequado e recomendado para sistemas complexos, como os petrolíferos, de modo que a análise de cada uma das consequências (*i.e* humana, ambiental, financeira e operacional) se dá de forma independente, em função das suas particularidades.

Conforme o que foi dito anteriormente, a identificação dos componentes críticos em um sistema tem um efeito na tomada de decisão mais assertiva que pode levar a um maior alcance no desempenho das operações industriais, com um potencial aumento da disponibilidade e efetividade das ações de manutenção. Além disso,

torna-se possível focalizar esforços na produção, utilizando apenas os recursos necessários, reduzindo assim o desperdício e custos.

Tal compreensão tem um impacto econômico direto para as indústrias, uma vez que podem tornar as ações mais eficientes e eficazes, com a alocação de correta de recursos financeiros, materiais e de capital humano, para planejar as ações de manutenção mais efetivas. Paralelo a essa discussão, a otimização do uso de recursos também pode ser encarada pelas empresas e organização como uma forma de tornar sua produção mais sustentável, com a redução de desperdícios.

Embora tenham sido identificados resultados significativos, esta pesquisa apresentou algumas dificuldades no seu andamento, principalmente no que concerne a obtenção de dados para construção das probabilidades, já que não há banco de dados de livre acesso no Brasil. Uma outra dificuldade foi a complexidade na realização da elicitación da função utilidade, foi necessário realizar este processo diversas vezes para obter resultados coerentes para a análise realizada.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Algumas sugestões para a elaboração de trabalhos futuros relacionados à utilização do modelo de decisão que integra um método multicritério para análise de criticidade estão descritas a seguir:

- Desenvolver um SAD (Sistema de apoio a decisão) para o processo da análise das consequências;
- Realizar aplicações numéricas baseadas em banco de dados de empresas;
- Definir variáveis e uma formulação matemática que permita uma melhor consideração da realidade do ambiente circunvizinho, ao sistema em estudo, e suas interferências;
- Incorporar novas dimensões para a avaliação das consequências decorrentes dos modos de falha

## REFERÊNCIAS

- AB-SAMAT, H.; KAMARUDDIN, S. Opportunistic maintenance (OM) as a new advancement in maintenance approaches. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 20(2), pp.98-121, 2014.
- AHMAD, R.; KAMARUDDIN, S. An overview of time-based and condition-based maintenance in industrial application. *Computers and Industrial Engineering*, v. 63, pp. 135-149, 2012.
- AIZPURUA, J. I.; CATTERSON, V. M.; PAPADOPOULOS, Y.; CHIACCHIO, F.; D'URSO, D. Supporting group maintenance through prognostics-enhanced dynamic dependability prediction. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 168, pp. 171-188, 2017.
- ANDRADE, E. M.; CALIXTO, E.; LACERDA, G. B. M.; Gerenciamento de riscos e avaliação de danos ambientais na indústria de petróleo. Monografia apresentada no PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2005.
- ARENDDT, J. S. Using quantitative risk assessment in the chemical process industry. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 29, n. 1, pp. 133-149, 1990.
- ARUNRAJ, N.; MAITI, J. Risk-based maintenance—Techniques and applications. *Journal of Hazardous Materials*, v.142(3), pp.653–661, 2007.
- ATTIA, M.; SINHA, J. Improved quantitative risk model for integrity management of liquefied petroleum gas storage tanks: Mathematical basis, and case study. *Process Safety Progress*, 2020.
- BEDFORD, T. Assessing the impact of preventive maintenance based on censored data. *Quality and Reliability Engineering International*, v. 20, pp.247-254, 2004.
- BERGER, James O. Prior information and subjective probability. In: *Statistical Decision Theory and Bayesian Analysis*. Springer, New York, NY, 1985. pp. 74-117.
- BERTOLINI, M.; BEVILACQUA, M.; CIARAPICA, F. E.; GIACCHETTA, G. Development of Risk-Based Inspection and Maintenance procedures for an oil refinery. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.22, pp. 244-253, 2009.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 70, n. 1, pp. 71-83, 2000.
- BHATIA, K.; KHAN, F.; PATEL, H.; ABBASSI, R. Dynamic risk-based inspection methodology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 62, pp. 103974, 2019.

BIONDI, C. O. Modelagem e otimização do planejamento da produção de uma refinaria de petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas. Recife, p. 109, 2016.

BRITO, A. J. M. Avaliação multicritério de riscos em gasodutos de gás natural: uma abordagem de classificação com o electre tri. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 164, 2007.

BRITO, A. J.; DE ALMEIDA, A. T.; MOTA, C. MM. A multicriteria model for risk sorting of natural gas pipelines based on ELECTRE TRI integrating Utility Theory. *European Journal of Operational Research*, v. 200, n. 3, pp. 812-821, 2010.

BROWN, S. J.; LE MAY, I. Risk-based hazardous release protection and prevention by inspection and maintenance. *J. Pressure Vessel Technol.*, v. 122, n. 3, pp. 362-367, 2000.

CAMPBELL, J. D.; JARDINE, A. K. Maintenance excellence: optimizing equipment life-cycle decisions. CRC Press, 2001.

CAMPELLO DE SOUZA, F. M. Decisões racionais em situações de incerteza. 1ª Edição. Recife, Ed Universitária, 2002.

CAMPOLINA, A. G.; CICONELLI, R. M. Quality of life and utility measures: clinical parameters for decision-making in health. *Revista panamericana de salud publica= Pan American journal of public health*, v. 19, n. 2, p. 128-136, 2006.

CARAZAS, F. J. G. Análise de disponibilidade de turbinas a gás em usinas termelétricas a ciclo combinado. Dissertação de mestrado. São Paulo: EPUSP, 2006. 123p.

CARRETERO, J.; PÉREZ, J. M.; GARCÍA-CARBALLEIRA, F.; CALDERÓN, A.; FERNÁNDEZ, J.; GARCÍA, J. D.; ... PRETE, P. Applying RCM in large scale systems: a case study with railway networks. *Reliability engineering & system safety*, v. 82, n. 3, pp. 257-273, 2003.

CARPITELLA, S.; CERTA, A.; IZQUIERDO, J.; LA FATA, C. M. A combined multi-criteria approach to support FMECA analyses: A real-world case. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 169, pp.394-402, 2018.

CASAL, Joaquim. Evaluation of the effects and consequences of major accidents in industrial plants. Elsevier, 2017.

CCPS – Center for Chemical Process Safety. Basic Principles of Flash Fires. In: *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2010. p. 147-156.

CCPS – Center for Chemical Process Safety. Basic Principles of Vapor Cloud Explosions. In: *Guidelines for Evaluating the Characteristics of Vapor Cloud Explosions, Flash Fires, and BLEVEs*. Hoboken, New Jersey, USA: AIChE. John Wiley & Sons, 2010. p. 69-145.

CHANG, M. K.; CHANG, R. R.; SHU, C. M.; LIN, K. N. Application of risk based inspection in refinery and processing piping. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v. 18, n. 4-6, pp. 397-402, 2005.

COSHAM, A.; HOPKINS, P.; MACDONALD, K. A. Best practice for the assessment of defects in pipelines—Corrosion. *Engineering Failure Analysis*, v. 14, n. 7, pp. 1245-1265, 2007.

COSTA, A. P. C. S.; DE ALMEIDA, A. T. Promethee multicriteria aid on priorities assignment of information systems. In: 2001 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. e-Systems and e-Man for Cybernetics in Cyberspace (Cat. No. 01CH37236), pp. 1913-1917. IEEE, 2001.

COSTA, C. B.; ALMEIDA, M. MENSOR Método Multicritério para Segmentação Ordenada. *Investigação Operacional*, v. 10, p. 19-28.

COSTA, H. G.; MANSUR, A. F. U.; FREITAS, A. L. P.; CARVALHO, R. A. D. ELECTRE TRI applied to costumers satisfaction evaluation. *Production*, v. 17, n. 2, pp. 230-245, 2007.

DAWOTOLA, A. W.; TRAFALIS, T. B.; MUSTAFFA, Z.; VAN GELDER, P. H. A. J. M.; VRIJLING, J. K. Risk-based maintenance of a cross-country petroleum pipeline system. *Journal of pipeline systems engineering and practice*, v. 4, n. 3, pp. 141-148, 2013.

DAY, J. A.; GEORGE, L. Opportunistic Replacement of fusion power system parts. *Reliability and Maintainability Symposium, California*, v.22, pp.16-27, 1982.

DEY, P. K. A risk-based model for inspection and maintenance of cross-country petroleum pipeline. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v.7, pp. 25-43, 2001.

DHILLION, B. S. *Engineering maintenance: a modern approach*. New York: CRC Press, 2002.

DIAS, L.; MOUSSEAU, V.; FIGUEIRA, J.; CLIMACO, J. An aggregation/disaggregation approach to obtain robust conclusions with ELECTRE TRI. *European Journal of Operational Research*, v. 138, n. 2, pp. 332-348, 2002.

DZIUBIŃSKI, M.; FRĄTCZAK, M.; MARKOWSKI, A. S. Aspects of risk analysis associated with major failures of fuel pipelines. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, v. 19, n. 5, pp. 399-408, 2006.

EL SHANAWANI, A. A. *Availability of maintained systems*. AIR FORCE INST OF TECH WRIGHT-PATTERSONAFB OH SCHOOL OF ENGINEERING, 1983.

FABER, M. H.; STEWART, M. G. Risk assessment for civil engineering facilities: critical overview and discussion. *Reliability engineering & system safety*, v. 80, n. 2, pp. 173-184, 2003.

- FARIAS, D. O. Avaliação quantitativa de risco de uma refinaria de petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, pp. 109, 2010.
- FARRIS, A. How the big data is changing the oil & gas industry, 2012. Disponível em: <<https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/LYTX.2012.06.02/full/>>. Acesso em: 05 jul. 2020.
- FIGUEIRA, J. R.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. ELECTRE methods. In: Multiple criteria decision analysis. Springer, New York, NY, 2016. pp. 155-185.
- FIGUEIRA, J.; MOUSSEAU, V.; ROY, B. ELECTRE methods. In: FIGUEIRA, J. GRECO, S.; EHRGOTT, M. (Ed.). Multiple criteria decision analysis: state of the art surveys. Springer Science, 2005;
- FOGLIATTO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009.
- FUJIYAMA, K.; NAGAI, S.; AKIKUNI, Y.; FUJIWARA, T.; FURUYA, K., MATSUMOTO, S. Risk-based inspection and maintenance systems for steam turbines. International Journal of Pressure Vessels and Piping, v. 81, n. 10-11, pp. 825-835, 2004.
- FUJIYAMA, K. Risk Based inspection and maintenance systems for steam turbine. International Journal of Pressure Vessels and Piping v.81, pp. 825-835, 2004.
- GOLBASI, O.; TURAN, M. O. A discrete-event simulation algorithm for the optimization of multi-scenario maintenance policies. Computers and Industrial Engineering, v.145, pp. 1082, 2020.
- GOMES, L. F. A. M.; GOMES, Carlos Francisco Simões; ALMEIDA, AT de. Tomada de decisão gerencial: enfoque multicritério. 2ª edição. São Paulo: Atlas, 2006.
- HALLALE, N.; MOORE, I.; VAUK, D. Hydrogen optimisation at minimal investment. Petroleum technology quarterly, v. 8, n. 3, pp. 83-90, 2003.
- HAMEL, K. D. Preventing Slip and Fall Injuries in the Oil and Gas Industry, 2021. Disponível em:<<https://ohsonline.com/articles/2021/02/01/preventing-slip-and-fall-injuries-in-the-oil-gas-industry.aspx?admgarea=news>>. Acesso em: 01 fev 2021.
- HARPHAM, B. How data science is changing the energy industry, 2016. Disponível em: <<http://www.cio.com/article/3052934/big-data/how-data-science-is-changing-the-energy-industry.html>>. Acesso em: 15 jul 2020.
- HASSAN, J.; KHAN, F. Risk-based asset integrity indicators. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, v. 25, n. 3, pp. 544-554, 2012.
- HELMANN, K. S. Uma sistemática para determinação da criticidade de equipamentos em processos industriais baseada na abordagem multicritério. Dissertação M.Sc., Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2008.

IQBAL, H.; TESFAMARIAM, S.; HAIDER, H.; SADIQ, R. Inspection and maintenance of oil & gas pipelines: a review of policies. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 13, n. 6, pp. 794-815, 2017.

JONES, B.; JENKINSON, I.; WANG, J. Methodology of using delay-time analysis for a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety*, v.94(1), pp.111–124, 2009.

JOVANOVIC, A. Risk-Based Component life Management in Fossil Power Plants. *Operation Maintenance and Materials Issues OMMI*, v.1, pp. 1 – 14, 2002.

KARDEC, A., NASCIF, J. *Manutenção – Função Estratégica*, 5ª ed. Rio de Janeiro, Qualitymark, 2019.

KAIO, N.; OSAKI, S. Optimal inspection policies: A review and comparison. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, v.119(1), pp.3–20, 1986.

KHALIFA, M.; KHAN, F.; THORP, J. Risk-based maintenance and remaining life assessment for gas turbines. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2015.

KHAN, F. I.; HADDARA, M. M. Risk-based maintenance (RBM): a quantitative approach for maintenance/inspection scheduling and planning. *Journal of loss prevention in the process industries*, v. 16, n. 6, pp. 561-573, 2003.

KHAN, F. I.; HADDARA, M.; KRISHNASAMY, L. A new methodology for risk-based availability analysis. *IEEE Transactions on Reliability*, v. 57, n. 1, pp. 103-112, 2008.

KHAN, F.; HADDARA, M; KHALIFA, M. Risk-based inspection and maintenance (RBIM) of power plants. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 82, pp.398-411, 2012.

KOOCHAKI, J.; BOKHORST, J. A. C.; WORTMANN, H.; KLINGENBERG, W. Condition based maintenance in the context of opportunistic maintenance. *International Journal of Production Research*, v.50(23), pp.6918-6929, 2012.  
KRISHNASAMY, L.; KHAN, F.; HADDARA, M. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.18, pp.69-81, 2005.

KRISHNASAMY, L.; KHAN, F.; HADDARA, M. Development of a risk-based maintenance (RBM) strategy for a power-generating plant. *Journal of Loss Prevention in the process industries*, v. 18, n. 2, pp. 69-81, 2005.

KUMAR, U. Maintenance strategies for mechanized and automated mining systems: a reliability and risk analysis based approach. *Journal of mines, metals and fuels*, v. 46, n. 11, pp. 343-347, 1998.

LEITE, W. A. *A Educação da Função Utilidade Multiatributo*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, p. 89. 2008.

- LEONI, L.; BAHOOTOROODY, A.; DE CARLO, F.; PALTRINIERI, N. Developing a risk-based maintenance model for a Natural Gas Regulating and Metering Station using Bayesian Network. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.57, pp. 17-24, 2019.
- LEWIS, S. A.; EDWARDS, T. G. Smart sensors and system health management tools for avionics and mechanical systems. In: 16th DASC. AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference. Reflections to the Future. Proceedings. v.2, pp. 8-5. IEEE, 1997.
- LI, F.; SUN, Y.; MA, L.; MATHEW, J. A grouping model for distributed pipeline assets maintenance decision. In: 2011 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering. IEEE, 2011. pp. 601-606.
- LOPES, R. S.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H. Delay-time inspection model with dimensioning maintenance teams: A study of a company leasing construction equipment. *Computers & Industrial Engineering*, v.88, pp.341–349, 2015.
- LOUIT, D.; PASCUAL, R.; BANJEVIC, D.; JARDINE, A. K. Optimization models for critical spare parts inventories—a reliability approach. *Journal of the Operational Research Society*, v. 62, n. 6, pp. 992-1004, 2011.
- LURIA, P.; ASPINALL, P. A. Evaluating a multi-criteria model for hazard assessment in urban design. The Porto Marghera case study. *Environmental Impact Assessment Review*, v. 23, n. 5, pp. 625-653, 2003.
- MODARRES, M.; KAMINSKIY, M. P.; KRIVTSOV, Vasiliy. Reliability engineering and risk analysis: a practical guide. CRC press, 2016.
- MOHAMED, A. M.; SAAD, S. M. Development of risk assessment model for equipment within the petroleum industry. *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 28, pp. 37-42, 2016.
- MOHAMED, R.; CHE H.; CHE R.; HAMID, M. D. Critical success factors of risk-based inspection. *Process Safety Progress*, v.38, pp. 4-20, 2019.
- MOUBRAY, J. The case against streamlined RCM. Aladon, UK, 2000.
- MOUSSEAU V.; SLOWINSKI, R; ZIELNIEWICZ, PP. A user-oriented implementation of the ELECTRE-TRI method integrating preference elicitation support. *Computers & Operations Research*, v 27, p. 757-777, 2000.
- MOUSSEAU, V.; DIAS, L. Valued outranking relations in ELECTRE providing manageable disaggregation procedures. *European Journal of Operational Research*, v. 156, n. 2, pp. 467-482, 2004.
- MOUSSEAU, V.; FIGUEIRA, J.; NAUX, J.-Ph. Using assignment examples to infer weights for ELECTRE TRI method: Some experimental results. *European Journal of Operational Research*, v. 130, n. 2, p. 263-275, apr. 2001.

MUNDA, G. Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy. Berlin: Springer, 2008.

NAKAMANURUCK, I.; RUNGREUNGANUN, V.; TALABGAEW, S. S. Reliability analysis for refinery plants. Applied Science and Engineering Progress, v. 10, n. 1, 2017.

NIELSEN, J. S.; TCHERNIAK, D.; ULRIKSEN, M. D. A case study on risk-based maintenance of wind turbine blades with structural health monitoring. Structure and Infrastructure Engineering, v. 17, n. 3, pp. 302-318, 2021.

PATRA, D. C.; ASATI, J. Disponível em: <<https://www.thehindubusinessline.com/opinion/challenges-ahead-for-oil-and-gas-sector/article33650496.ece>>. Acesso em: 30 jan 2021.

PENG, Há.; ZHU, Q. Approximate evaluation of average downtime under an integrated approach of opportunistic maintenance for multi-component systems. Computers & Industrial Engineering, v. 109, pp. 335-346, 2017.

PERRYMAN, L. J.; FOSTER, N. A. S.; NICHOLLS, D. R. Using PRA in support of maintenance optimisation. International journal of pressure vessels and piping, v. 61, n. 2-3, pp. 593-608, 1995.

PERRYMAN, L.; FOSTER, N.; NICHOLLS, D. Using PRA in support of maintenance optimization. International Journal of Pressure Vessels and Piping v.61, pp. 593-608, 1995.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. John Wiley & Sons, 2003.

RAUSAND, M.; HOYLAND, A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications. John Wiley & Sons, 2003.

REYNOLDS, J.T, 2000, "Development and Application of API Risk Based Inspection Planning for Petroleum and Petrochemical Facilities." In: VI ETEC, Rio de Janeiro. RIBEIRO, J.; FOGLIATTO, F. Confiabilidade e Manutenção Industrial. Belo Horizonte: Elsevier, 2009.

ROY, B.; MOUSSEAU, V.; FIGUEIRA, J. ELECTRE methods. 2005.

SÁNCHEZ, M. Introducción a la confiabilidad y evaluación de riesgos. Facultad de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, 2005.

SÁNCHEZ, M. S. Introducción a la confiabilidade y evaluación de Riesgos; Bogotá-Colombia: Ediciones Unidas, 2005. 466p.

SCHÄRLIG, A. Pratiquer Electre et Prométhée: un complément à " Décider sur plusieurs critères". PPUR presses polytechniques, 1996.

SHAFIEE, M. Maintenance strategy selection problem: an MCDM overview. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, v. 21 No. 4, pp. 378-402, 2015.

SMITH, A. M.; HINCHCLIFFE, G.R. RCM gateway to world class maintenance. Oxford: Linacre House, Jordan Hill, 336p., 2004.

STAMATIS, D. H. (2003). Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution. ASQ Quality Press.

STEPHENS, D. R.; LEIS, B. N. Development of an alternative criterion for residual strength of corrosion defects in moderate-to high-toughness pipe. In: international pipeline conference. American Society of Mechanical Engineers, v.40252, pp. V002T06A012, 2000.

STRAUB, D.; FABER, M.H. Systems effects in generic risk-based inspection planning, in Proceedings of 21st Offshore Mechanics and Arctic Engineering Conference, 23–28 June 2002, Oslo.

TAN, Z.; LI, J.; WU, Z.; ZHENG, J.; HE, W. An evaluation of maintenance strategy using risk based inspection. *Safety science*, v. 49, n. 6, pp. 852-860, 2011.

TNO – THE NETHERLANDS ORGANISATION. Yellow Book – Methods for the calculation of physical effects. 3. ed. The Hague, Committee for Prevention of Disasters, 2005.

TSANG, A.H.C. Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in maintenance Engineering*, v.8, pp.7-39, 2002.

TYLER, D. F. & GENDRON, R. P. The identification & control of reliability - Critical items. *Reliability Review*, v. 6, pp. 8-9, 1986.

VESELY, W. E.; BELHADJ, M.; REZOS, J. T. PRA importance measure for maintenance prioritization applications. *Reliability Engineering and System Safety* v.43, pp. 307-318, 1993.

VESELY, W. E.; BELHADJ, M.; REZOS, J. T. PRA importance measures for maintenance prioritization applications. *Reliability engineering & system safety*, v. 43, n. 3, pp. 307-318, 1994.

VON NEUMANN, J.; MORGENSTERN, O. Theory of games and economic behavior, 2nd rev. 1947.

WANG, H; PHAM, H. Reliability and optimal maintenance. Springer Science & Business Media, 2006.

WANG, Z.; YANG, J.; WANG, G.; ZHANG, G. Sequential imperfect preventive maintenance policy with random maintenance quality under reliability limit. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, v.225(8), pp.1926-1935, 2011.

YAKOVLEV, V. V.; KALUGIN, YU I.; KALUGIN, A. YU.; STEPOVA, N. G. Mathematical modelling of enhanced gas production. *Journal of petroleum exploration and production technology*, v. 9, pp. 561-571, 2019.

YAZDI, M.; NEDJATI, A.; ABBASSI, R. Fuzzy dynamic risk-based maintenance investment optimization for offshore process facilities. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, v.57, pp.194-207, 2019.

ZHENG, XT.; FARD, N. A maintenance policy for repairable systems based on opportunistic failure-rate tolerance. *IEEE T Reliab* v. 40(2) pp. 237–244, 1991.  
ZHOU, X.; SHI, K. Capacity failure rate based opportunistic maintenance modeling for series-parallel multi-station manufacturing systems. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 181, pp. 46-53, 2019.

ZHOU, Y.; MA, L.; MATHEW, J.; KIM, H.; WOLFF, R. Asset life prediction using multiple degradation indicators and lifetime data: a gamma-based state space model approach. In *Reliability, Maintainability and Safety, 2009. ICRMS 2009. 8th International Conference on* (pp. 445-449): IEEE.