



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO ACADÊMICO DO AGRESTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

JOSÉ SÁVIO SILVA GONÇALVES

**UM ESTUDO DA METODOLOGIA MULTIDIMENSIONAL HAZOP (MHAZOP)
APLICADA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

**CARUARU
2024**

JOSÉ SÁVIO SILVA GONÇALVES

**UM ESTUDO DA METODOLOGIA MULTIDIMENSIONAL HAZOP (MHAZOP)
APLICADA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Área de concentração: Otimização e Gestão da Produção.

Orientador: Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez

CARUARU
2024

JOSÉ SÁVIO SILVA GONÇALVES

**UM ESTUDO DA METODOLOGIA MULTIDIMENSIONAL HAZOP (MHAZOP)
APLICADA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Aprovada em: 21/03/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Prof. Dr. Walton Pereira Coutinho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

Profa. Dra. Vanessa Batista Schramm (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

Dedico este trabalho ao meu eterno guerreiro e herói, meu pai, José Jodeci Gonçalves (*in memoriam*), sei que de onde estiver está me olhando com orgulho por ter realizado esse sonho que não era só meu, mas sim nosso. Obrigado por tudo, todos os seus ensinamentos foram fundamentais para me tornar o ser humano que sou hoje, por sempre acreditar que eu seria capaz de chegar tão longe, devo tudo isso a ti paim, te levarei comigo não só nesse, mas em todos os momentos de conquistas na minha vida. Que eu possa um dia me tornar metade do ser humano maravilhoso que o senhor foi aqui na terra. Te amarei para além da eternidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem a sua benção nada disso seria possível, pelo discernimento e oportunidades que me foi dado ao longo desse período de pós-graduação.

Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, Jodeci Gonçalves (*in memoriam*) e Maria do Socorro Gonçalves, e a minha querida tia Maria Gonçalves, pois foi através do incessante amor, paciência e apoio mesmo distantes, que pude tornar este sonho realidade.

Agradeço imensamente a Universidade Federal de Pernambuco e a todos os professores do PPGE-CAA, que repassaram os seus conhecimentos, em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Thalles Vitelli Garcez, sem sua instrução e paciência nada disso seria possível.

Agradeço também ao pessoal do Laboratório REASON que me deram diversas assistências quando precisei, pois foram de grande valor para execução do meu trabalho.

Agradeço a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), que financiou todo esse projeto ao longo do meu período de mestrado.

E por último e não menos importante, agradeço a todos os meus colegas da Pós, aos meus amigos da minha cidade no Ceará e também aos que fiz em Caruaru e Recife, que de alguma forma me ajudaram nesta etapa, gratidão pelo apoio que me foi dado nesse momento tão sonhado da minha vida.

RESUMO

O gerenciamento de risco sugere o princípio de correlacionar exatamente a incerteza em um determinado ambiente, que está diretamente ligado a probabilidade de sua ocorrência, em um evento indesejado e como suas consequências terão um impacto significativo. Os transformadores de potência são equipamentos críticos e importantes no sistema elétrico de energia, portanto, apresentam riscos significativos que devem ser considerados, além de ser, normalmente, o equipamento de maior custo dentro do sistema de distribuição de energia. Alguns dos riscos mais comuns associados a transformadores incluem: riscos elétricos, incêndios e explosões. Desta forma, a avaliação de risco multidimensional permite fazer uma análise mais abrangente e completa dos riscos. Para isso, a metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP) considera múltiplas dimensões de risco, agregando a metodologia de avaliação de risco HAZOP (*Hazard and Operability Study*) e a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). A aplicação dessa metodologia no contexto de transformadores de energia é de suma importância, pois o decisor terá uma visão mais clara e objetiva do problema enfrentado, permitindo-lhe assim, tomar uma decisão mais fundamentada com base em um modelo quantitativo de risco que integra a sua estrutura de preferência. Além disso, a metodologia fornece como resultado uma hierarquia de risco dos desvios identificados, permitindo assim ao decisor alocar recursos de prevenção e/ou mitigação dos riscos de forma a atender primeiro aqueles desvios mais críticos, uma vez que, normalmente, os recursos são limitados e escassos. Para tanto, foi realizada uma aplicação numérica com dados realísticos em transformador 3000kVa imerso a óleo. O estudo considerou o nó correspondente a parte ativa do transformador, compostas pelo núcleo e enrolamentos. Como resultado da metodologia MHAZOP, encontrou-se a hierarquia de risco dos 15 desvios analisados. O desvio mais crítico foi o desvio “menor fluxo magnético”. Este desvio pode causar sobrecarga nos enrolamentos e/ou ressonância de vibração gerando os cenários de perigo de vazamento de óleo, explosão e incêndios.

Palavras-chave: Gerenciamento de Risco. Sistemas de Energia Elétrica. Transformadores de Potência. Risco Multidimensional. MHAZOP.

ABSTRACT

Risk management suggests the principle of accurately correlating the uncertainty in each environment, which is directly linked to the probability of its occurrence, in an undesirable event and how its consequences will have a significant impact. Power transformers are critical and important equipment in the electric power system; therefore, they present significant risks that must be considered, in addition to being, normally, the most expensive equipment within the power distribution system. Some of the most common risks associated with transformers include: electrical hazards, fires and explosions. In this way, the multidimensional risk assessment allows for a more comprehensive and complete analysis of the risks. For this, the Multidimensional HAZOP (MHAZOP) methodology considers multiple risk dimensions, aggregating the Hazard and Operability Study (HAZOP) risk assessment methodology and the Multi-Attribute Utility Theory (MAUT). The application of this methodology in the context of power transformers is of paramount importance, as the decision-maker will have a clearer and more objective view of the problem faced, thus allowing him to make a more informed decision based on a quantitative risk model that integrates its preference structure. In addition, the methodology provides as a result a risk hierarchy of the identified deviations, thus allowing the decision-maker to allocate resources for prevention and/or mitigation of risks to first address those most critical deviations, since, normally, resources are limited and scarce. To this end, a numerical application was carried out with realistic data in a 3000kVa oil-immersed transformer. The study considered the node corresponding to the active part of the transformer, composed of the core and windings. As a result of the MHAZOP methodology, the risk hierarchy of the 15 analyzed deviations was found. The most critical deviation was the deviation "lower magnetic flux". This deviation can cause overload in the windings and/or vibration resonance, generating the hazard scenarios of oil leakage, explosion and fires.

Keywords: Risk Management. Electric Power System. Power Transformers. Multidimensional Risk. MHAZOP.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma representando a metodologia aplicada	18
Figura 2 –	Fluxograma representando as etapas do MHAZOP	44
Figura 3 –	Parte ativa do transformador (núcleo e enrolamentos)	47
Figura 4 –	Mortes por choque elétrico por local de ocorrência (2013-2022)	69
Figura 5 –	Fatalidades e incêndios de origem elétrica por equipamento (2022)	70
Figura 6 –	Função utilidade do critério 1	75
Figura 7 –	Função utilidade do critério 2	76
Figura 8 –	Função utilidade do critério 3	78
Figura 9 –	Tipos e quantidades de falhas identificadas nos três grupos de transformadores de potência	95
Figura 10 –	Porcentagem das falhas nos transformadores	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Acidentes reais ocorridos no brasil envolvendo transformadores de potência em um período de 10 anos	15
Tabela 2 –	Aplicação de identificação das alternativas (desvios)	57
Tabela 3 –	Consequências do atributo C_1 para sua respectiva utilidade	75
Tabela 4 –	Consequências do atributo C_2 para sua respectiva utilidade	76
Tabela 5 –	Consequências do atributo C_3 para sua respectiva utilidade	77
Tabela 6 –	Etapas de 6 a 10 do estudo MHAZOP	89
Tabela 7 –	Função probabilidade das consequências para cada um dos desvios	93
Tabela 8 –	Probabilidade dos cenários de perigo	96
Tabela 9 –	Representação da função perda para cada um dos desvios	98
Tabela 10 –	Função risco e ordenamento em hierarquia	99
Tabela 11 –	Análise de sensibilidade para os três critérios nos diferentes cenários	102
Tabela 12 –	Rankings gerados através das análises de sensibilidade	102

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos	16
1.3	IMPACTO SOCIAL	16
1.4	METODOLOGIA	17
1.5	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	19
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1	GERENCIAMENTO DE RISCO	20
2.2	HAZOP	25
2.3	MULTIDIMENSIONALIDADE DO RISCO	27
2.4	MÉTODO HAZOP	28
2.5	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	29
2.5.1	Análise de risco em transformadores de potência	30
2.5.2	Risco multidimensional em transformador de potência	34
3	REVISÃO DA LITERATURA	36
3.1	GERENCIAMENTO DE RISCO EM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA	36
4	METODOLOGIA MULTIDIMENSIONAL HAZOP (MHAZOP) APLICADA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	43
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA APLICAÇÃO NUMÉRICA COM DADOS REALÍSTICOS	45
4.2	ETAPAS DA ANÁLISE	49
4.2.1	DEFINIÇÃO DO DECISOR	49
4.2.2	DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MHAZOP	50
4.2.3	FASE DE PREPARAÇÃO	50
4.2.4	DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE APLICAÇÃO	51
4.2.5	DEFINIÇÃO DOS NÓS E PARÂMETROS	51

4.2.6	IDENTIFICAÇÃO DOS DESVIOS	56
4.2.7	IDENTIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO	58
4.2.8	ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO	59
4.2.9	ESTRUTURA DE PREFERÊNCIA DO DM	67
4.2.9.1	<i>Critério 1: Número de fatalidades, envolvendo pessoas que trabalham com transformadores</i>	68
4.2.9.2	<i>Critério 2: Tempo para reestabelecer o sistema de volta à normalidade (downtime)</i>	71
4.2.9.3	<i>Critério 3: Custo financeiro</i>	71
4.2.9.4	<i>Elicitação da função utilidade multiatributo</i>	72
4.2.10	IDENTIFICAÇÃO DAS MEDIDAS DE CONTROLE	79
4.2.11	ESTIMAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROBABILIDADE DAS CONSEQUÊNCIAS	91
4.2.12	ESTIMAÇÃO DAS PROBABILIDADES DOS CENÁRIOS DE PERIGO $\pi d(\Theta)$	94
4.2.13	CÁLCULO DA FUNÇÃO PERDA	97
4.2.14	ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO RISCO $rd(i, j \times j, g \times g)$	99
4.2.15	ORDENAMENTO DOS DESVIOS EM HIERARQUIA DE RISCO	100
4.2.16	ANÁLISE DA HIERARQUIA DOS RISCOS E ANÁLISE SENSIBILIDADE	100
4.2.17	IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE GERENCIAMENTO DE RISCO	103
4.2.18	RELATÓRIO E MONITORAMENTO	105
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	106
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores são importantes equipamentos de uma subestação de energia elétrica, desde a geração, transmissão e distribuição até a entrega final aos usuários. Um transformador a óleo é composto por diversos componentes como um núcleo e as suas bobinas, essas são imersas em um óleo isolante de alta qualidade, como o óleo mineral, que serve para resfriar o transformador e funciona como isolante elétrico. O óleo proporciona estabilidade térmica e elétrica, além de ser vital para transferir o calor gerado durante o funcionamento do transformador, e o conjunto é abrigado em um invólucro metálico hermético, garantindo proteção contra agentes externos e preservando a eficiência e a segurança do equipamento (SONI; MEHTA, 2023).

A parte ativa que é o foco do trabalho, compreende o núcleo de ferro laminado e os enrolamentos de cobre, que por sua vez, segundo Li *et al.* (2023), é constituído com lâminas de ferro silício, que proporciona um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético gerado pela corrente alternada nos enrolamentos, onde a energia é transferida por indução eletromagnética. A eficiência e a capacidade de um transformador estão intimamente ligadas à qualidade do material utilizado na parte ativa, bem como ao projeto preciso do núcleo e dos enrolamentos para assegurar a transferência eficaz de energia com mínimas perdas.

Levando então o gerenciamento de risco para o contexto de transformadores de potência, pode-se observar a sua importância devido aos potenciais perigos associados ao seu funcionamento. O óleo isolante usado nesses transformadores desempenha um papel vital na eficiência e na segurança do dispositivo, mas também representa um risco significativo de incêndio e explosões causados por vazamento. Portanto, estratégias de gerenciamento de risco se concentram na prevenção de falhas no transformador, no monitoramento constante das condições do óleo e no desenvolvimento de planos de contingência para lidar com possíveis emergências, como vazamento ou superaquecimento (MEHAIRAJAN *et al.*, 2015).

Outro aspecto crítico do gerenciamento de risco em transformadores a óleo é a conformidade com regulamentos de segurança e riscos ambientais, pois o vazamento do óleo pode causar impactos ambientais significativos, contaminando o solo e a água. Portanto, as estratégias de gerenciamento também incluem medidas para minimizar o impacto ambiental de possíveis desvios, como a instalação de sistemas de contenção e a implementação de procedimentos para lidar com derramamentos de óleo de forma rápida e eficaz, dentre outras maneiras, garantindo assim o foco na segurança operacional e na conformidade regulatória garantindo a proteção do meio ambiente e dos consumidores (GARCÍA *et al.*, 2021).

No mercado atual, o gerenciamento de risco em transformadores é fundamental para garantir a continuidade operacional, a segurança e a sustentabilidade das redes elétricas até o seu consumidor final. Além disso, com a ênfase na eficiência energética e na redução de impactos ambientais, estratégias de gerenciamento de risco visam não apenas garantir a confiabilidade dos transformadores, mas também minimizar vazamentos de óleo e otimizar a manutenção preventiva, resultando em operações mais sustentáveis e econômicas. Essa abordagem proativa e centrada na gestão de riscos é crucial para as empresas de energia que buscam manter a confiabilidade de suas operações em um ambiente dinâmico e desafiador (AMOIRALIS; TSILI; KLADAS, 2009).

Os custos associados à compra de um transformador de potência na classe de tensão de 500 kV chega a ser mais de milhões. As multas aplicadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), são significativas quando há indisponibilidade do equipamento por algum defeito ou falha. Dessa maneira, as empresas de energia têm se empenhado na manutenção preventiva e preditiva a fim de manter esses equipamentos em um programa de manutenção eficaz, evitando a presença de falhas (LIMA; SAAVEDRA; MIRANDA, 2015).

Existem diversas técnicas que são utilizadas para o diagnóstico e análise de falhas em transformadores, mas pouco se discute sobre metodologias que auxiliem no processo de tomada de decisão quando se é necessário, principalmente em cenários com uma multidimensionalidade de riscos associados. Por isso, utilizar-se de ferramentas e metodologias que possam priorizar os riscos identificados e, conseqüentemente, as alternativas de prevenção e mitigação dos riscos, são fatores essenciais para o apoio no processo de tomada de decisão, na qual trata-se de uma finalidade comum para o gerenciamento de risco (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Desta forma, o uso de metodologias de gerenciamento de risco que agreguem a multidimensionalidade do risco e a estrutura de preferência do decisor torna-se de extrema necessidade nesse processo.

Decisões são tomadas sobre as operações e substituições de suas infraestruturas nas subestações periodicamente. Porém, o risco de falhas de um ativo e possíveis incêndios ou explosões devem ser levados em consideração. No entanto, o desafio em estabelecer a probabilidade de certa falha é que, como dada a sua taxa ser muito baixa, muitas das vezes existe pouca informação estatística à disposição para essa análise. Ainda, como consequência de acidentes em um transformador, é provável ocorrer falhas em outros equipamentos na subestação afetada, acarretando um efeito cascata na operação de todo o sistema de energia (MARTIN *et al.*, 2019).

A metodologia MHAZOP foi formulada por Garcez e Alencar (2022), que propõe uma nova abordagem de análise de risco agregando a metodologia de análise de risco HAZOP (Estudo de Perigos e Operabilidade - *Hazard and Operability Study*, em inglês) com a abordagem multicritério MAUT (Teoria da Utilidade Multiatributo). Tal abordagem foi escolhida por permitir analisar a multidimensionalidade do risco e levar em consideração múltiplas dimensões de consequências sob a estrutura de preferência do decisor.

Ainda, reconhecendo que conduzir uma análise da vida útil do equipamento e ter uma visão geral do sistema, seja a melhor maneira de mitigar falhas e conseqüentemente reduzir custos, através da implementação da metodologia proposta no estudo, que tem como foco principal o gerenciamento de riscos multidimensionais presentes nas instalações de transformadores de potência, com o auxílio do método MHAZOP, buscar as causas dos riscos das falhas, cenários de perigo, suas dimensões de consequências, classificando e propondo ações mitigadoras adequadas para cada desvio e seu respectivo cenário de perigo, classificando assim os de maior impacto na distribuição de energia elétrica.

E visando abordar essa problemática, o presente trabalho busca realizar uma apresentação da metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP) e aplicá-la numericamente no contexto de transformadores de potência.

1.1. JUSTIFICATIVA

Este trabalho justifica-se pelo crescente aumento dos custos dos equipamentos presentes em uma subestação elétrica em diversos trabalhos citados na literatura, principalmente nos transformadores. Desta forma, visando uma busca de métodos de mitigação para minimizar os riscos que possam ocorrer e seus respectivos impactos humanos, financeiros, dentre outros, pode-se maximizar os resultados acerca do gerenciamento dos riscos nas possíveis falhas, certificando-se que o funcionamento do equipamento e do sistema elétrico esteja de forma apropriada.

Além disso, a importância de avaliar o risco multidimensional neste tipo de equipamento está em avaliar o risco sob diferentes dimensões de consequências que pode afetar o sistema em um determinado desvio ou mais. Nesse contexto, a multidimensionalidade faz-se uso através de uma abordagem que antecipe esses riscos com mais estratégias, e vise a mitigação total ou parcial do risco, com táticas preventivas e monitoramento contínuo após a implementação.

Exemplos de acidentes reais ocorridos no Brasil como os apresentados na Tabela 1 são a prova de que é de suma importância gerenciar riscos envolvendo os transformadores de potência em suas várias dimensões de consequências.

Tabela 1 - Acidentes reais ocorridos no Brasil envolvendo transformadores de potência em um período de 10 anos

Local/data	Acidente	Consequência
Foz do Iguaçu (Junho/2006)	Explosão em um dos transformadores de Itaipu, desencadeada por um defeito na bucha. (ITAIPU)	A geração de energia não foi comprometida. Seis pessoas ficaram feridas e houve perda total do transformador.
São Paulo (Março/2008)	Explosão de um transformador de uma subestação de energia elétrica, causado por um curto-circuito. Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP)	Cerca de 690 mil pessoas ficaram sem energia elétrica durante 50 minutos.
São Paulo (Abril/2008)	Explosão de transformadores de uma subestação de energia elétrica, causado por um curto-circuito. Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista (CTEEP)	Cerca de 318 mil residências ficaram sem energia e cerca de 200 mil ficaram sem água em função da interrupção do trabalho de bombeamento.
Araruama (Setembro/2015)	Explosão de um transformador causou um incêndio na subestação de energia. (AMPLA)	O fornecimento de energia na cidade foi comprometido.
Porto Alegre (Janeiro/2016)	Explosão de um transformador. Companhia Estadual de Energia Elétrica (CEEE)	Aproximadamente 30 mil pessoas ficaram sem energia elétrica por cerca de 4 horas.
Brasília (Junho/2016)	Incêndio em transformador devido a causas não divulgadas. Companhia Energética de Brasília (CEB)	Parte da Esplanada dos Ministérios e alguns prédios do Setor de Autarquias Norte, do Setor Bancário Norte e da Vila Planalto ficaram sem luz. O sistema do metrô ficou fora do ar por cerca de 20 minutos.

Fonte: Adaptado de (PAULA; SANTI, 2018)

1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO

Neste tópico estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos do trabalho.

1.2.1. Objetivo geral

O presente trabalho tem como foco principal realizar uma apresentação da metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP) e aplicá-la no contexto de transformadores de potência.

1.2.2. Objetivos específicos

Para a concretização do objetivo geral do trabalho proposto, são necessárias algumas etapas relevantes que devem ser desenvolvidas. Desta forma, os objetivos específicos são:

- Contextualizar sobre os transformadores de potência, onde será abordado: funcionalidade, composição, importância, óleo isolante, vantagens em sua utilização e riscos associados;
- Executar a aplicação do modelo de gerenciamento de riscos em forma de aplicação numérica com dados realísticos em transformadores de potência a óleo, utilizando a metodologia MHAZOP;
- Buscar as causas dos riscos das falhas, cenários de perigo, suas dimensões de consequências e propostas de ações mitigadoras adequadas para os desvios mais críticos e seu respectivo cenário de perigo, ranquear e priorizar os de maior impacto no uso do equipamento.
- Apresentar uma análise crítica através dos resultados obtidos com a aplicação do modelo.

1.3. IMPACTO SOCIAL

No cenário atual, destaca-se que os riscos associados a transformadores de potência podem ter vários impactos sociais. De acordo com a literatura, pode-se perceber uma diversidade de causas que estão associadas, bem como a interrupção no fornecimento de energia, na qual falhas nos transformadores de potência podem resultar em interrupções no fornecimento de energia elétrica para residências, empresas e instituições, podendo consequentemente causar inconveniência, perda de produtividade e prejuízos econômicos (SUWANASRI; SUWANASRI; PHADUNGTHIN, 2015).

Impacto na saúde e segurança também podem ocorrer em casos extremos, as falhas nos transformadores podem levar a incêndios ou explosões, representando um perigo para a segurança das pessoas que vivem ou trabalham nas proximidades. Além disso, o calor gerado por um transformador com mau funcionamento pode causar desconforto nas áreas circundantes. Outro impacto social recorrente é o desenvolvimento industrial e econômico, onde grandes

indústrias e empresas dependem de energia elétrica confiável para operar, e interrupções frequentes no fornecimento podem afetar negativamente a produção e a eficiência, prejudicando o desenvolvimento industrial e econômico de uma região (ZHANG *et al.*, 2021).

Serviços públicos e infraestrutura crítica também podem ser citados, setores como saúde, segurança pública e comunicações dependem da energia elétrica para operar seus serviços à população, sendo assim, interrupções prolongadas podem comprometer a capacidade de hospitais, serviços de emergência e centros de comunicação em continuar funcionando adequadamente. A desigualdade social gerada em áreas com recursos financeiros limitados pode ser mais afetada por interrupções no fornecimento de energia, e isso pode agravar as desigualdades sociais, já que comunidades carentes podem ter dificuldade em se recuperar rapidamente dessas situações (READ *et al.*, 2020).

Riscos ambientais como a qualidade do ar, onde alguns transformadores que utilizam o óleo isolante têm, podendo ocasionar vazamento em caso de falha, causando assim a contaminação do solo e da água, afetando a qualidade do meio ambiente e da biodiversidade. Além disso, a queima de óleo isolante também pode liberar poluentes no ar, prejudicando a qualidade do ar (CHEN *et al.*, 2021).

No quesito de mobilidade e transporte, as interrupções no fornecimento de energia elétrica podem afetar o funcionamento de sistemas de transporte público elétrico, como trens e bondes, causando atrasos e inconveniências para os passageiros, que conseqüentemente causará prejuízos financeiros e serão necessárias reparações ou substituição dos transformadores danificados, que pode ser um processo caro e demorado, e os custos associados a essas operações podem afetar a estabilidade financeira das empresas de energia elétrica e, eventualmente, ser repassados aos consumidores por meio de aumentos nas tarifas (SUWANASRI; SUWANASRI; PHADUNGTHIN, 2015).

Desta forma, através dos vários exemplos de cenários citados é nítido o impacto que os riscos relacionados aos transformadores de potência têm na sociedade, e o potencial de causar uma série de impactos sociais é eminente, afetando áreas como fornecimento de energia, segurança, economia, saúde, meio ambiente e qualidade de vida das comunidades afetadas.

1.4. METODOLOGIA

A pesquisa utilizou uma abordagem quali-quantitativa, tendo em vista que houve a necessidade de explorar primeiramente a parte qualitativa, foi realizada uma revisão bibliográfica na base de dados da *Web of Science*, por permitir identificar com rapidez as

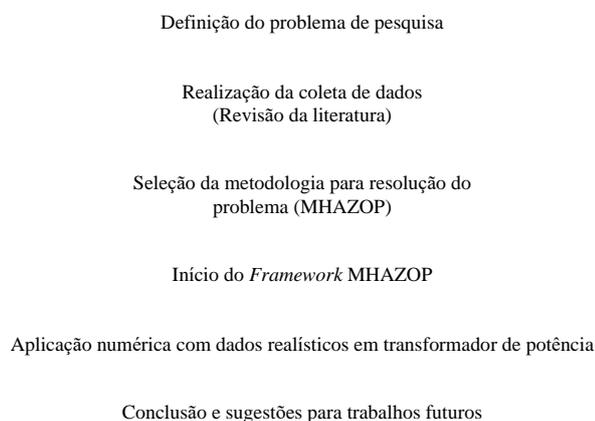
publicações (com os correspondentes autores, títulos e resumos) que citaram o gerenciamento de risco em transformador de potência, no período de fevereiro de 2014 a janeiro de 2023, a qual usou-se da estratégia de extrair artigos pertinentes à pesquisa, conjuntamente com trabalhos acadêmicos também relacionados ao tema, para obtenção de dados necessários para contextualizar acerca de acidentes (incêndios, explosões, vazamentos de óleo, vítimas, etc.), e suas consequências em transformadores de potência nos últimos dez anos.

Após realizado o processo de filtração através de palavras-chave chegou-se ao total de 97 trabalhos, na qual realizou-se a leitura e extraiu-se o que era pertinente, como dados numéricos, acidentes envolvendo transformadores, número de vítimas, dentre outros. Logo, após a obtenção dos dados necessários iniciou-se a parte quantitativa, onde foram construídas planilhas no Excel e realizadas análises das funções das probabilidades das múltiplas consequências nos cenários de perigo, funções de perda, risco e análises de sensibilidade, tudo isso envolvendo técnicas estatísticas para análise de dados (CAUCHICK; HO, 2010).

A pesquisa envolveu um objetivo exploratório através do *framework* da metodologia HAZOP Clássica com a parte multidimensional do risco, a qual adiciona-se a sua estrutura a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT), tornando-se uma só, denominada Multidimensional HAZOP (MHAZOP), para observar os cenários de perigo e suas várias dimensões de consequências no contexto de transformadores de potência através de uma aplicação numérica com dados realísticos, onde após a aplicação dos dezoito passos propostos pela metodologia pode-se ter uma real noção de onde estão concentrados as principais consequências desses cenários, e com base nisso pôde-se construir uma hierarquia de prioridade dos riscos e assim o decisor pode propor as melhores ações mitigadoras.

A Figura 1 representa em forma de fluxograma o processo que foi seguida a metodologia do trabalho.

Figura 1 - Fluxograma representando a metodologia aplicada



Fonte: O autor (2024)

1.5. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O capítulo 1 discorre sobre a introdução do trabalho, abordando o problema proposto que é a análise de risco em transformadores de potência, expondo a importante relevância que tem nesse contexto. Contendo também o objetivo geral do trabalho e as etapas relevantes que devem ser desenvolvidas, ou seja, os objetivos específicos. Contendo ainda o seu impacto na sociedade e a metodologia que foi utilizada.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica do trabalho, onde será abordado temas como Gerenciamento de risco, estudo HAZOP, Risco Multidimensional, o *framework* MHAZOP, que fundamentam o modelo que fora utilizado no trabalho. Contendo ainda detalhes do equipamento utilizado no estudo (transformador de potência), a análise de risco e sua multidimensionalidade.

O capítulo 3 aborda a revisão da literatura com relação a problemática do trabalho e a contextualiza, onde expõe o gerenciamento de risco em transformadores de potência e sua análise, onde também é discorrido sobre composição, histórico, cadeia produtiva e vantagens do equipamento em questão.

O capítulo 4 discorre sobre a proposição do uso do MHAZOP para gerenciamento de risco em transformador de potência, a apresentação e a explanação das dezoito etapas da metodologia, bem como definição do decisor, dos limites de aplicação, cenários de perigo, medidas de controle, funções de probabilidade dos cenários de risco, das perdas, dos riscos, ranqueamento, análises de sensibilidade e por fim implementações das ações do gerenciamento dos riscos. Destacando-se que todas as etapas tem interações com o decisor, até a finalização do trabalho. Apresenta ainda a contextualização da aplicação numérica com dados realísticos do modelo no decorrer de suas etapas.

Por fim, no capítulo 5 é apresentada a conclusão do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. GERENCIAMENTO DE RISCO

O gerenciamento de risco começou a se expandir para além dos setores financeiros e de seguros a partir dos anos 70 e 80, sendo adotado por empresas em diversos setores. Com o tempo, a complexidade e a interconectividade global aumentaram, exigindo abordagens mais abrangentes e sofisticadas para gerenciar riscos. Isso levou ao surgimento de campos especializados, como a gestão de riscos corporativos, que se concentra na identificação, avaliação e mitigação em uma ampla gama de riscos que podem afetar uma organização, desde questões financeiras até aspectos operacionais. Atualmente, o gerenciamento de riscos é uma disciplina essencial em praticamente todas as áreas, permitindo a tomada de decisões informadas e a redução de impactos negativos em um ambiente constantemente mutável e desafiador (MCSHANE, 2018).

A gestão do risco é estabelecida como sendo todas as medidas e atividades realizadas para o gerenciamento do risco. Ela se trata em encontrar um equilíbrio inerentes acerca da exploração das oportunidades por um lado e esquivar-se de acidentes, perdas e desastres, por outro (AVEN, 2015). Levando ainda em consideração que a gestão de riscos se relaciona com todas as atividades, eventos e condições que possam evitar com que a organização se prejudique em relação aos seus objetivos traçados.

O risco apresenta-se em diversos contextos, desde uma simples ida ao trabalho ou ao mercado até formas que as pessoas acham impossíveis, complexas ou difíceis de acontecer. Mediante a essa observação nota-se que a sociedade está à sua mercê diariamente e em qualquer lugar, e diante de tantas opções a literatura nos traz algumas definições do uso desse termo (DE ALMEIDA *et al.*, 2015), sugerem que o conceito mais básico está correlacionado exatamente com a incerteza em um ambiente, que está diretamente ligado a probabilidade de sua ocorrência em um evento indesejado e como suas consequências terão um impacto significativo.

O gerenciamento de risco como uma disciplina e prática sistemática começou a ganhar atenção e desenvolvimento no final do século XX, à medida que as organizações se tornaram mais conscientes dos riscos envolvidos em suas operações e buscas por maneiras eficazes de lidar com eles. Vários eventos significativos e tendências contribuíram para o crescimento do gerenciamento de risco, eventos catastróficos como desastres naturais e acidentes industriais, que destacaram a necessidade de preparação para mitigar esses riscos. Esses eventos chamaram

a atenção para a importância de identificar e gerenciar os riscos associados a eles (FRIDAY *et al.*, 2018).

A gestão de riscos na maioria das empresas é dividida em três categorias principais: risco estratégico, risco financeiro e risco operacional. O risco estratégico é aquele em que as consequências para a empresa são influenciadas por fusões e aquisições, tecnologia, concorrência, condições políticas, leis e regulamentos, mercado de trabalho e assim por diante. O risco financeiro é o risco em que as consequências para a empresa são influenciadas pelo mercado a qual está associado a alterações no valor de um investimento devido a movimentos nos fatores de mercado como preços de ações, taxas de juros, taxas de câmbio, etc. O risco operacional é o risco cujas consequências para o empreendimento resultam de questões de segurança ou relacionadas à proteção como eventos acidentais, atos intencionais, dentre outros. Para que uma empresa seja bem-sucedida na implementação do gerenciamento de riscos, a alta administração precisa estar envolvida e as atividades devem ser realizadas em diversos níveis.

Alguns pontos cruciais para garantir o sucesso são o estabelecimento de uma estratégia de gestão de riscos, ou seja, os princípios de como a empresa define e executa a gestão de riscos. O estabelecimento de um processo de gestão de riscos para o empreendimento, bem como processos formais e rotinas que a empresa deva seguir. O estabelecimento de estruturas de gestão, com funções e responsabilidades, de maneira a que o processo de análise de risco fique integrado na organização. A implementação de sistemas de análise e suporte, como por exemplo, ferramentas de análise de risco e sistemas de registro de ocorrências de vários tipos de eventos. E por último e não menos importante a comunicação, formação e desenvolvimento de uma cultura de gestão do risco, de forma a potenciar o nível de competência, compreensão e motivação da organização (AVEN, 2015)

O risco pode ser entendido como estando em função de alguns fatores, como vulnerabilidade, perigo e exposição. O seu gerenciamento concede o entendimento dessa dinâmica ao direcionamento aos setores públicos e privados a terem suas decisões tomadas baseando-se em desenvolvimento de modelos para gerenciar riscos incertos e com distribuições probabilísticas (NASCIMENTO, 2016).

Com o entendimento dessas funções de fatores torna-se possível um melhor processo de desenvolvimento e cumprimento de protocolos que avaliem e monitorem com uma boa comunicação, podendo assim tomar medidas protetivas e conseqüentemente uma mitigação do risco.

Em qualquer organização ou empreendimento é necessário que haja um gerenciamento dos riscos potenciais que podem afetar o alcance dos objetivos e metas daquele local. O processo envolve a identificação, avaliação e mitigação para minimizar a probabilidade de ocorrência de eventos adversos e maximizar as oportunidades, tornando-se crucial para a tomada de decisão. Em um conceito geral o risco pode ocorrer em vários campos, como negócios, finanças, seguros, segurança, engenharia entre outros. E em uma revisão geral sobre o tema, destacam-se alguns dos principais conceitos e áreas que se aplica o gerenciamento de risco (NBR IEC ISO 31010, 2021). Risco ambiental, risco operacional, risco humano, risco financeiro, e muitos outros que existem e estão presentes no cotidiano de várias pessoas. Cada tipo de risco possui características específicas e requer abordagens distintas de gerenciamento. Com isso foram definidas algumas etapas para o processo, como a identificação, análise e avaliação, desenvolvimento de estratégias de mitigação, implementação de medidas de controle, monitoramento contínuo e revisão do processo.

Algumas técnicas podem auxiliar o processo de gerenciamento de riscos, tais como a ferramenta HAZOP, a análise FMEA, a análise SWOT, a análise de árvore de falhas (ETA), análise de causa raiz (RCA), análise de cenários, análise de sensibilidade, entre outros. Cada método tem suas próprias especificidades, contendo vantagens e desvantagens metodológicas e são aplicadas de acordo com a situação e o contexto específico. Além disso, a tecnologia desempenha um papel cada vez mais importante no gerenciamento de risco, a automação, o uso de dados em tempo real e a análise de big data são algumas das ferramentas tecnológicas que podem melhorar a capacidade de identificar e mitigar riscos de maneira eficiente (WU; LIU; NIE, 2021).

Essa visão geral abrange os principais aspectos do gerenciamento de risco. No entanto, é importante ressaltar que a literatura sobre o assunto é ampla e continua evoluindo à medida que novas abordagens, tecnologias e desafios surgem. Evidenciando ainda que o gerenciamento de risco eficaz envolve entender a natureza e a probabilidade de riscos potenciais, avaliar seu impacto potencial e implementar estratégias para minimizá-los ou evitá-los, podendo assim ajudar a proteger contra perdas e garantir o sucesso a longo prazo (EMBLEMSVÅG, 2010).

Ao longo da história deu-se, inicialmente, trabalhou-se a visão unidimensional do risco, na qual se consegue “ver” apenas uma única dimensão de consequência, normalmente, tratado pelo número de fatalidades em determinado evento, ou seja, apenas um aspecto ou característica que poderia influenciar a natureza e o impacto de um determinado risco.

No entanto, como visto anteriormente, é essencial compreender os diversos elementos relacionados a um risco específico, levando em consideração suas diferentes facetas e variáveis relevantes. E devido se tratar de algo deste nível, não se pode levar em consideração apenas uma dimensão de impacto, logo, seria necessário a análise em mais dimensões para a realização do estudo, sendo assim considerado um processo multidimensional onde nesse contexto aborda vários tipos de riscos simultaneamente, tornando-se importante considerar e abordar múltiplas dimensões para uma gestão eficaz do risco organizacional (ANDREOLI; ZOLI, 2020).

Além disso, o desenvolvimento de ferramentas e técnicas para o avanço da tecnologia e o desenvolvimento de modelos matemáticos e estatísticos permitiram uma melhor compreensão e avaliação dos riscos. Técnicas como a *Value at Risk* (VaR) e a análise de sensibilidade se tornaram amplamente utilizadas nas práticas de gerenciamento de risco (LÓPEZ; MANTOVANI; SANZ, 2014).

Segundo D'Amico *et al.* (2014), pode-se observar que o gerenciamento de risco evoluiu para uma abordagem mais abrangente e holística, que considera múltiplas dimensões e sua interconexão, tornando assim a abordagem multidimensional um gerenciamento que permite uma compreensão mais completa e integrada dos riscos que uma organização enfrenta.

Com isso, as normas e regulamentações evoluíram, tanto em nível nacional quanto internacional, começando a enfatizar a necessidade de uma abordagem abrangente para o gerenciamento de riscos. Isso levou ao avanço de suas práticas, e à medida que a disciplina do gerenciamento amadureceu, surgiram novas metodologias e técnicas que permitiram uma avaliação mais ampla e holística dos riscos (TEPELI; TAILLANDIER; BREYSSE, 2021).

Tendo em vista todo o contexto que a literatura nos mostra, pode-se entender a necessidade de um gerenciamento eficaz de riscos multidimensionais que requer uma abordagem mais proativa e estratégica, com foco na mitigação, transferência e estratégias de prevenção de riscos. Além disso, requer um monitoramento e avaliação contínua para garantir que eles sejam adequadamente gerenciados e controlados (GEORGESCU; KINNUNEN, 2011).

O gerenciamento de risco é um processo muito abrangente, segundo Cheng *et al.* (2018), que envolve diversas etapas como a identificação, análise, avaliação e tratamento dos riscos em uma organização ou projeto. Contudo existem diferentes abordagens que podem ser encontradas na literatura, mas geralmente todas envolvem basicamente a mesma sequência:

- O estabelecimento do contexto, onde nessa etapa inicial, é importante definir o escopo do gerenciamento de risco e estabelecer o contexto em que o processo

será realizado. Isso inclui identificar os objetivos, as partes interessadas envolvidas, os limites do sistema ou projeto, bem como quaisquer restrições ou regulamentações relevantes;

- A identificação dos riscos, que envolve a identificação sistemática de todos os riscos potenciais que podem afetar os objetivos estabelecidos. Isso pode ser feito por meio de técnicas como análise documental, entrevistas, inspeções de campo e análise de dados históricos. O objetivo é criar uma lista abrangente de eventos ou condições que possam gerar perdas ou impactos negativos;
- A análise dos riscos, onde eles são identificados e avaliados em termos de sua probabilidade de ocorrência e do impacto que podem causar. A análise pode ser qualitativa, utilizando escalas descritivas, ou quantitativa, com base em dados e cálculos estatísticos. O objetivo é priorizar os riscos com base em sua gravidade e probabilidade, para focar nas áreas de maior impacto potencial;
- A avaliação dos riscos, que envolve a combinação dos resultados da análise de riscos com critérios estabelecidos previamente, como níveis de tolerância ou critérios de aceitação de riscos. Essa etapa visa determinar quais riscos são considerados aceitáveis e quais requerem ações de tratamento imediata;
- Tratamento dos riscos, onde após a avaliação dos riscos, é necessário definir e implementar medidas de tratamento para lidar com os riscos considerados inaceitáveis ou indesejáveis. Essas medidas podem incluir estratégias de mitigação, transferência de riscos por meio de seguros ou contratos, implementação de controles de segurança, entre outras ações. O objetivo é reduzir a probabilidade de ocorrência dos riscos ou minimizar seus impactos;
- Fase final onde é feito o monitoramento e a revisão, é um processo contínuo e é importante monitorar regularmente a eficácia das medidas de tratamento implementadas. Isso envolve acompanhar os riscos identificados, revisar sua relevância e atualizar as ações de tratamento conforme necessário. O monitoramento também permite identificar novos riscos que possam surgir devido a mudanças no contexto ou nas operações;
- Última etapa faz-se a comunicação e a consulta, que durante todo o processo é fundamental para promover a comunicação eficaz e a consulta com todas as partes interessadas envolvidas. Isso inclui compartilhar informações sobre os riscos identificados, as ações de tratamento implementadas e os resultados do

monitoramento. A comunicação transparente ajuda a promover a conscientização sobre os riscos e a obter apoio e cooperação das partes interessadas.

Essas etapas do gerenciamento de risco fornecem uma estrutura geral para abordar os riscos em qualquer projeto, e é importante adaptar o processo às necessidades específicas de cada contexto e utilizar-se de métodos e técnicas adequados para uma análise abrangente e eficaz dos riscos.

2.2. HAZOP

O estudo HAZOP (*Hazard and Operability Study*), também conhecido como Estudo de Perigos e Operabilidade, é uma abordagem estruturada e sistemática comumente usada em indústrias de diversas áreas, e foi projetado para identificar perigos que possam gerar acidentes nas diferentes áreas da instalação, além de perdas na produção em razão de descontinuidade operacional com o intuito de melhorar a segurança, confiabilidade e eficiência de seus ativos (DUNJÓ *et al.*, 2010).

A estruturação da metodologia HAZOP clássica é obtida através da estruturação de seis etapas da seguinte forma sistêmica, segundo Garcez e Alencar (2022), efetuar a divisão do equipamento e/ou sistema em subsistemas, atentando para os componentes dos subsistemas; escolher os pontos de um destes subsistemas para a análise, o qual chamamos de nós; determinar os parâmetros de avaliação, bem como, temperatura, pressão, estanqueidade, dentre outros; aplicar as palavras-guia que servirão de ajuda para o processo de verificação dos desvios passíveis de ocorrência dentro dos nós; identificar as causas para cada um desses desvios, verificando a detecção através de meios disponíveis; e por fim, verificar as ações de mitigação e os perigos identificados.

Além disso, o estudo HAZOP envolve uma equipe de especialistas multidisciplinares que examinam sistematicamente todo o processo ou sistema em consideração para identificar e avaliar os possíveis desvios do projeto pretendido ou das condições operacionais. Para isso, a equipe usa um conjunto de palavras-guia (como, mais, menos, nenhum, etc.) para estimular o pensamento e explorar possíveis desvios nos parâmetros do processo, como fluxo, pressão, temperatura e composição. Posteriormente, a equipe HAZOP identifica possíveis causas e consequências dos desvios e avalia sua probabilidade e gravidade. Subsequente, desenvolvem-se recomendações para mitigar ou eliminar os perigos identificados e os problemas de operacionalidade (GARCEZ; ALENCAR, 2019).

O resultado de um estudo HAZOP é um relatório que documenta as descobertas, recomendações e planos de ação para o estudo. O relatório serve como base para o projeto, modificação ou operação do processo ou sistema para melhorar sua segurança, confiabilidade e eficiência (DUNJÓ *et al.*, 2010).

Em geral, o estudo HAZOP é uma ferramenta valiosa para a gestão de riscos e segurança do processo, pois ajuda a identificar potenciais perigos e problemas de operacionalidade antes que eles ocorram, permitindo que medidas proativas sejam tomadas para minimizar os riscos associados ao processo ou sistema.

Pode-se citar alguns dos seus benefícios como sendo (GARCEZ; ALENCAR, 2022):

- A identificação abrangente de perigos, mostrando que o HAZOP é uma abordagem sistemática que permite uma análise detalhada de diferentes cenários e condições operacionais, o que ajuda a identificar uma ampla gama de perigos potenciais;
- A avaliação de riscos, onde a metodologia permite avaliar a probabilidade de ocorrência de cada perigo identificado e analisar suas consequências. Isso ajuda a priorizar os riscos e concentrar os esforços de mitigação onde eles são mais necessários;
- A melhoria da operabilidade que além de identificar perigos também analisa as operações e procedimentos existentes. Portanto, pode levar a recomendações para melhorar a eficiência operacional, confiabilidade e segurança dos sistemas;
- A participação de especialistas que envolve uma equipe multidisciplinar, incluindo especialistas em engenharia, operações e segurança. Essa colaboração permite uma análise mais completa e uma abordagem holística para a identificação de perigos;
- Uma abordagem preventiva, que ao identificar perigos potenciais antes que eles ocorram, oferece a oportunidade de implementar medidas de mitigação e evitar incidentes graves. Isso pode reduzir os custos associados a danos materiais, interrupções de produção e, mais importante, proteger a saúde e a segurança dos trabalhadores e do público.

No entanto, segundo Garcez e Alencar (2019), existem algumas limitações quanto a utilização da ferramenta HAZOP clássica, tais como:

- Por ser uma abordagem qualitativa, ou seja, não fornece uma análise de dados quantitativos, influencia significativamente na tomada de decisão;
- a dependência da experiência da equipe, onde o sucesso da sua aplicação dependa em grande parte da experiência e conhecimento dos envolvidos no estudo;
- a falta de especialistas qualificados pode limitar a eficácia da análise e a identificação de perigos ocultos;
- o foco limitado em causas externas, pois o HAZOP geralmente se concentra em causas internas ao sistema ou processo analisado, deixando de lado possíveis perigos provenientes de fontes externas, como desastres naturais ou eventos de origem humana fora do controle direto da organização;
- certas limitações na identificação de perigos emergentes, o seu uso torna-se mais eficaz na identificação de perigos conhecidos e estabelecidos. No entanto, pode ser menos adequada para identificar perigos emergentes associados a tecnologias ou processos inovadores;
- a demanda de tempo e recursos, onde a condução de uma análise HAZOP completa pode ser um processo demorado e requer a participação de uma equipe multidisciplinar, e isso pode representar um desafio logístico e financeiro para algumas organizações;
- a manutenção da relevância ao longo do tempo, pois as operações e sistemas estão em constante evolução, o que significa que os perigos e riscos associados também mudam, tornando-se necessário um esforço contínuo para manter a relevância da análise HAZOP ao longo do tempo, por meio de revisões e atualizações regulares.

Embora a metodologia HAZOP tenha algumas deficiências, destacadas anteriormente, ela continua sendo uma ferramenta valiosa para identificar e mitigar perigos em sistemas industriais. É importante considerar essas limitações e complementar a análise HAZOP com outras técnicas de segurança, conforme necessário, para garantir uma abordagem abrangente e eficaz para a gestão de riscos

2.3. MULTIDIMENSIONALIDADE DO RISCO

Como mencionado anteriormente, os riscos multidimensionais trata-se de avaliar o risco operacional sob diferentes dimensões de consequências. A avaliação de riscos

multidimensionais envolve a identificação e análise dos diferentes riscos ou múltiplas consequências que podem afetar um sistema, projeto ou organização e a avaliação de seu impacto potencial e probabilidade de ocorrência. Requer uma abordagem abrangente e integrada que leve em consideração as interações e interdependências entre os diferentes tipos de riscos (JI *et al.*, 2022).

E embora seja difícil traçar uma origem específica para o conceito de risco multidimensional, ele evoluiu ao longo do tempo em resposta a diversos fatores, tais como a complexidade crescente das organizações e o aumento da globalização, onde o avanço tecnológico e as mudanças no ambiente empresarial passaram a enfrentar riscos provenientes de várias fontes e dimensões das consequências. Essa complexidade exigiu uma abordagem mais holística para gerenciar esses riscos de maneira eficaz (POLANSKI; STOJA; ZHANG, 2013).

Portanto, o gerenciamento eficaz de riscos multidimensionais requer uma abordagem proativa e estratégica, com foco na mitigação de riscos, transferência de riscos e estratégias de prevenção de riscos. Além disso, requer um monitoramento e avaliação contínua para garantir que eles sejam adequadamente gerenciados e controlados após a implementação da ação de mitigação (GARCEZ; ALENCAR, 2019).

2.4. MÉTODO MHAZOP

A metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP), proposto por Garcez e Alencar (2022), é uma abordagem avançada que é utilizada em vários cenários para identificar e analisar riscos em processos industriais complexos. A metodologia integra a metodologia HAZOP clássica com a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT). O MHAZOP pode levar em consideração múltiplas dimensões de consequências, como segurança, saúde, meio ambiente e aspectos operacionais. Ela dispõe de contribuições no gerenciamento de riscos, podendo prever seus cenários e efetuar uma avaliação multidimensional das preferências por parte do decisor. Essa abordagem mais abrangente permite uma avaliação mais holística dos riscos associados às operações industriais, o que não é o caso do HAZOP tradicional, que se concentra principalmente em desvios de processo em uma única dimensão de consequência, o que é raramente encontrado em processos produtivos (DE ARAÚJO; GARCEZ. T. V., 2020).

E embora existam várias abordagens bastante utilizadas na literatura para o contexto do gerenciamento de risco, Garcez e Alencar (2022) propuseram um novo modelo estruturado incorporando uma abordagem multidimensional de riscos e incertezas, onde então serão

analisadas pelo decisor (DM). A metodologia HAZOP, embora seja muito eficiente e utilizada também no gerenciamento de riscos possui algumas limitações, como por exemplo, ser uma abordagem qualitativa, onde o foco está no brainstorming que é desenvolvido pela equipe, logo, o decisor não tem papel crucial no processo decisório, e ao gerar desvios, o ponto de partida indutivo/dedutivo é contraintuitivo, logo, não considera fatores como desvios compostos.

No MHAZOP, uma equipe multidisciplinar analisa sistemática e detalhadamente os aspectos do processo industrial, identificando os possíveis desvios e falhas que podem levar a riscos. Os atores envolvidos no estudo de risco avaliam não apenas os riscos operacionais, mas também consideram os impactos em termos de segurança, saúde e meio ambiente. Essa metodologia permite a identificação de medidas de controle adequadas e estratégias de mitigação para reduzir os riscos identificados (GARCEZ; ALENCAR, 2022).

Com isso, a nova metodologia MHAZOP, que é estruturada em dezoito passos (Figura 2), pode dispor-se de contribuições no desenvolvimento de um estudo do gerenciamento de risco de transformadores de potência com imersão a óleo, podendo prever seus vários cenários de perigo, como por exemplo, sobrecarga térmica, curto-circuito, falhas no isolamento ou vazamento de óleo isolante, e efetuar uma avaliação multidimensional das preferências por parte do decisor para cada cenário (DE ARAÚJO; GARCEZ. T. V., 2020).

2.5. TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Um transformador de potência é um tipo de transformador elétrico usado para transferir energia elétrica de um circuito para outro por indução eletromagnética. São comumente usados em sistemas de energia elétrica para aumentar ou diminuir a tensão de uma fonte de alimentação CA (ABNT NBR 5653-1, 2017).

Um transformador de potência consiste em duas ou mais bobinas de fio isolado, que são enroladas em torno de um núcleo feito de ferro ou aço laminado. As bobinas são isoladas eletricamente umas das outras, sendo que uma delas é conectada à fonte de tensão de entrada, enquanto a outra é conectada à carga. Quando uma tensão CA é aplicada à bobina primária, ela cria um campo magnético variável que induz uma tensão na bobina secundária (BATTAL; BALCI; SEFA, 2021).

Os transformadores de potência são usados em uma variedade de aplicações, incluindo sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia, bem como em ambientes industriais e comerciais. São componentes essenciais em sistemas elétricos, proporcionando a transformação de tensão necessária para garantir a transferência segura e eficiente de energia

elétrica. A energia elétrica é repassada para a rede de transmissão, e o transformador de distribuição, que é a última etapa antes da energia elétrica chegar até o consumidor (BATTAL; BALCI; SEFA, 2021).

A subdivisão do transformador para executar as suas funções de projetos demandam uma série de acessórios e componentes, certificando o funcionamento sob condições de temperatura e estanqueidade contida, internamente às especificações do projeto, com isso torna-se necessária uma perspectiva mais detalhada do transformador, onde seu sistema geral divide-se em subsistemas, tais como, parte ativa; acessórios; preservação do óleo; e, arrefecimento. Na qual, os subsistemas ainda se subdividem em uma série de respectivos componentes, tais como: núcleo, enrolamentos e buchas; comutador de derivação em carga e três diferentes tipos de relés; tanque principal e de expansão, secador de ar e bolsa de borracha; e, radiador e moto ventilador (DE ARAÚJO; GARCEZ. T. V., 2020).

Os transformadores de potência são importantes equipamentos de uma subestação desde a geração até a entrega final aos usuários. Os custos associados à compra de um transformador de potência na classe de tensão de 500 kV chega a ser mais de milhões. As multas aplicadas pelos órgãos reguladores (ANEEL) são significativas quando há indisponibilidade do equipamento por algum defeito ou falha. Dessa maneira, as empresas de energia têm se empenhado na manutenção preventiva e preditiva a fim de manter esses equipamentos em um programa de manutenção eficaz, evitando a presença de falhas (LIMA; SAAVEDRA; MIRANDA, 2015).

2.5.1. Análise de risco em transformadores

De acordo com Mehairajan *et al.* (2015), os transformadores de potência estão sujeitos a várias falhas que podem afetar sua operação segura e eficiente, gerando uma diminuição considerável da sua vida útil ou até mesmo a parada total do equipamento. Uma dessas falhas é a sobrecarga térmica, que ocorre quando o transformador é operado além de sua capacidade nominal, ou seja, leva a um aumento da temperatura, o que pode causar degradação dos materiais isolantes e diminuir a vida útil dele, resultando em um aumento excessivo da temperatura. Outra falha significativa é a ocorrência de descargas parciais, que são pequenas descargas elétricas ocorridas dentro do transformador e pode levar à deterioração dos materiais isolantes. Esse fenômeno é um importante indicador de possíveis falhas futuras e deve ser monitorado regularmente para evitar danos adicionais aos seus componentes.

Existe o envelhecimento do óleo isolante que com o tempo pode se degradar devido a processos de oxidação, envelhecimento e contaminação. Isso pode comprometer a eficiência do isolamento, a confiabilidade do equipamento e a capacidade do transformador de dissipar o calor gerado durante a operação. O óleo isolante é usado para evitar a formação de arcos elétricos e dissipar o calor gerado. Além disso, as falhas nos enrolamentos do transformador também representam um risco significativo, pois estes estão sujeitos a esforços mecânicos e térmicos, e caso ocorra uma falha em um dos enrolamentos, o transformador pode ser levado a uma interrupção completa ou a uma redução significativa de sua capacidade (BRACALE; CARPINELLI; DE FALCO, 2019).

Na literatura são citados diversos tipos de modos de falhas, tais como o curto-circuito interno, que pode ocorrer devido a uma variedade de razões, incluindo falhas de isolamento, descargas parciais ou falhas nas conexões. Essa condição pode resultar em danos graves ao transformador e à rede elétrica circundante. Outro fator de risco é a exposição a condições ambientais adversas, como altas temperaturas, umidade excessiva, corrosão e poluição. Essas condições podem acelerar a degradação dos materiais e comprometer a sua operação segura e confiável (PERIN, 2014).

Além disso, pode ocorrer vibrações excessivas que podem ser prejudiciais ao transformador, afrouxando conexões elétricas e mecânicas, causando desalinhamento de peças e, eventualmente, levando a falhas. Adicionalmente, existem as falhas no sistema de proteção, que é projetado para monitorar e interromper o transformador em caso de falha ou mau funcionamento. A falha do sistema de proteção pode levar a atrasos na resposta a eventos críticos ou até mesmo à falta de proteção adequada. É claro, não se pode descartar os erros humanos, que também são bem comuns e podem ocorrer, por exemplo a operação inadequada, a manutenção negligente ou a instalação incorreta do transformador de potência, que podem introduzir riscos adicionais e comprometer a segurança tanto dos trabalhadores quanto das pessoas que recebem a energia elétrica (PHADUNGTHIN; HAEMA, 2017).

Desta forma, o gerenciamento de risco no transformador de potência é um processo essencial para garantir a segurança de pessoas, equipamentos e meio ambiente durante a operação do mesmo, podendo ser realizada seguindo as seguintes etapas, respectivamente (SUWANASRI; SUWANASRI; PHADUNGTHIN, 2015):

- Identificação dos perigos, que envolve a identificação de perigos associados ao transformador de potência, como falhas no isolamento, vazamentos de óleo, sobrecarga, curto-circuito, entre outros;

- avaliação de riscos, onde os riscos associados aos perigos identificados são avaliados em termos de sua probabilidade e impacto potencial. Isso pode ser feito através de análises de risco quantitativas ou qualitativas;
- controle de riscos, que envolve a implementação de medidas de controle para reduzir ou eliminar os riscos identificados. As medidas de controle podem incluir a instalação de sistemas de proteção, manutenção preventiva, treinamento e inspeções regulares;
- monitoramento e a revisão, que envolve o monitoramento contínuo dos riscos associados ao transformador de potência e a revisão regular do processo de avaliação de riscos para garantir que os riscos estejam sendo gerenciados adequadamente.

Uma das principais áreas de análise de risco do transformador é a avaliação da confiabilidade. Isso envolve a análise de falhas potenciais, como falhas de isolamento, problemas de refrigeração, defeitos nos enrolamentos e outros componentes críticos. Por meio de técnicas de análise de risco, como análise de árvore de falhas e análise de confiabilidade, é possível identificar as principais fontes de risco e desenvolver estratégias adequadas para mitigá-las (ROMERO; MOMBELLO; RATTÁ, 2012).

Além disso, a análise de risco em transformadores também considera os aspectos de segurança. Isso envolve a avaliação de riscos relacionados a incêndios, explosões, vazamentos de óleo e choques elétricos. A identificação de pontos vulneráveis e a implementação de medidas de proteção adequadas, como sistemas de detecção e supressão de incêndio e isolamento adequado, são cruciais para reduzir os riscos de segurança (READ *et al.*, 2020).

Alguns exemplos são relatados na literatura de acidentes que ocorreram pelo mundo com transformadores, tais como (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2012).

- o acidente na Usina Nuclear de Fukushima Daiichi (Japão) em 2011, onde após o terremoto e o tsunami que atingiram a região, houve uma série de falhas nos sistemas de resfriamento dos reatores nucleares. Isso levou a um superaquecimento dos transformadores de potência, resultando em incêndios e explosões. Esses acidentes causaram vazamento de radiação e tiveram graves consequências para a saúde humana e o meio ambiente.
- o incêndio na subestação de Loma Linda (Califórnia, EUA) em 2005, onde um transformador de potência em uma subestação elétrica falhou e pegou fogo, resultando em uma grande explosão e incêndio. O incêndio causou uma falha

no fornecimento de energia para cerca de 40.000 residências e empresas na região, além de danos significativos à infraestrutura elétrica local.

- no Brasil, um acidente em uma subestação elétrica em Itabira (Minas Gerais) em 2019, onde um transformador de uma subestação elétrica superaqueceu e explodiu, causando um incêndio de grandes proporções. O fogo se espalhou rapidamente e atingiu outros equipamentos e estruturas próximas. Esse acidente resultou na interrupção do fornecimento de energia para uma parte da cidade e exigiu esforços significativos para combater o incêndio e reparar os danos causados (DUARTE, 2004).

Outro aspecto importante da análise de risco é a consideração dos impactos ambientais. Os transformadores de potência contêm óleos isolantes que podem representar riscos ambientais em caso de vazamento, que será de fato o foco desse trabalho. Um relato de acidente real de vazamento de óleo isolante de transformadores de potência ocorreu em 2017, na cidade de Nova York (EUA), onde na ocasião um transformador localizado em um prédio na cidade de Manhattan começou a vazar óleo isolante, o vazamento resultou em uma grande quantidade de óleo derramado nas ruas próximas, causando grandes preocupações ambientais, pois o derramamento de óleo diretamente no meio ambiente pode ser prejudicial devido a presença de substâncias tóxicas e contaminantes, exigindo uma resposta rápida das autoridades. Mediante esse e outros cenários existentes, a análise de risco envolve a avaliação das consequências ambientais potenciais e a implementação de medidas de contenção e mitigação para minimizar o impacto de vazamentos deste óleo (MARTIN *et al.*, 2019).

A análise financeira também é um impacto levado em conta em um evento inesperado, tendo em vista que o transformador é um equipamento de alto valor econômico, e de suma importância para os sistemas elétricos, e a análise de risco ajuda a identificar os riscos financeiros associados à falha ou interrupção dele. Com base nessa análise, as organizações podem tomar decisões informadas sobre a alocação de recursos para manutenção, reparo ou substituição de transformadores (OUGHTON *et al.*, 2017).

Segundo Mehairajan *et al.* (2015), o tratamento dos riscos em transformadores de potência envolve uma abordagem holística que combina medidas preventivas, monitoramento contínuo e ações corretivas. Na literatura podem ser citadas algumas ações para evitar essas falhas inesperadas, tais como: a manutenção preventiva, ou seja, implementar um programa para identificar e mitigar riscos antes que eles se tornem problemas significativos. Isso inclui inspeções regulares, testes de rotina, limpeza e substituição de componentes desgastados.

O monitoramento contínuo também pode ajudar bastante a reduzir falhas, com o uso de sistemas de monitoramento avançados, como o de temperatura, o de descargas parciais e sistemas de monitoramento de óleo, que pode permitir detectar precocemente sinais de riscos em potencial. Dessa forma, é possível tomar medidas preventivas ou corretivas oportunamente.

A análise de risco e avaliação de vulnerabilidades pode realizar uma análise abrangente e avaliar as vulnerabilidades específicas de cada transformador que ajuda a identificar as principais áreas de preocupação e permite a implementação de medidas de mitigação adequadas e priorização de recursos. Claramente uma atualização tecnológica torna-se necessária, para utilizar-se de tecnologias avançadas de isolamento, sistemas de resfriamento eficientes e materiais de alta qualidade, podendo assim reduzir significativamente os riscos multidimensionais em transformadores de potência. Além disso, a substituição de transformadores antigos por modelos mais modernos e eficientes pode melhorar a segurança e a confiabilidade (BUSTAMANTE *et al.*, 2016).

O treinamento e conscientização aos operadores e técnicos envolvidos na operação e manutenção do equipamento é de fundamental importância. Isso inclui conhecimento sobre os riscos envolvidos, boas práticas de segurança, procedimentos de manutenção adequados e uso correto de equipamentos de proteção individual (EPI). O desenvolvimento de planos de contingência e resposta a emergências é essencial para lidar com situações imprevistas. Isso inclui ações como desligamento rápido do transformador em caso de uma falha grave, procedimentos de evacuação e planos de comunicação claros em casos de emergência. Diante disso é necessária a colaboração com especialistas em casos mais complexos ou de alto risco, para avaliar os problemas e propor soluções adequadas. Isso pode incluir consultores especializados, engenheiros elétricos e fabricantes de transformadores (CARNEIRO; JARDINI; BRITTES, 2012).

Desta maneira uma análise de risco em um transformador abrange uma variedade de dimensões, incluindo confiabilidade, segurança, impacto ambiental e aspectos financeiros, assim sendo, ao identificar e avaliar os riscos envolvidos, é possível implementar medidas adequadas para mitigar esses riscos, garantindo a operação confiável e segura do equipamento (BIN *et al.*, 2019).

2.5.2. Risco multidimensional em transformador de potência

O transformador de potência é um componente vital em sistemas de transmissão de energia elétrica, que é responsável por aumentar ou diminuir a tensão elétrica para transporte

eficiente de energia até o consumidor final. No entanto, o uso contínuo e a natureza crítica desses dispositivos os expõem a vários riscos multidimensionais (MEDINA *et al.*, 2017).

O uso do MHAZOP no contexto de transformadores de potência é justificado devido aos potenciais riscos e consequências associados a esse equipamento, devido sua técnica de análise sistemática que tem por objetivo identificar e avaliar os perigos e falhas operacionais em um sistema ou processo. No caso dos transformadores, ele desempenha um papel crítico no fornecimento de energia elétrica e qualquer falha ou acidente envolvendo esses equipamentos pode ter impactos significativos na segurança, na operação e no meio ambiente (DE ARAÚJO; GARCEZ. T. V., 2020). Ao examinar em detalhes os componentes, as operações, as interações e os procedimentos de segurança relacionados aos transformadores de potência, o MHAZOP ajuda a desenvolver medidas preventivas e mitigadoras para minimizar os riscos e melhorar a segurança operacional desses equipamentos essenciais.

Vale ressaltar que essas medidas podem variar dependendo das especificidades de cada transformador e de suas condições operacionais. É importante realizar uma avaliação individualizada e consultar equipes de profissionais especializados para obter as melhores estratégias de tratamento de riscos para cada caso (LU *et al.*, 2018).

Logo, através de todas as análises e verificações identificadas na literatura sobre o uso do transformador de potência com imersão a óleo, torna-se pertinente o uso da metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP), visto que o equipamento pode ocasionar inúmeros riscos ao longo da sua vida útil em diversos cenários, com isso existe a necessidade de identificar os seus desvios, causas e modos de falha, consequências e identificar as medidas de controle necessárias para sua mitigação, e visto que existem questões como essas, necessita-se de uma coleta de dados quantitativos para aplicação do método proposto, tornando-se então necessária a sua aplicação no estudo.

3. REVISÃO DA LITERATURA

Depois de explorada a base conceitual do trabalho, torna-se necessária uma contextualização acerca da problemática que expõe o gerenciamento do risco multidimensional no contexto de análise de risco em transformadores de potência, mostrando assim a clara diferenciação da utilização do MHAZOP.

Foram usadas na revisão da literatura as seguintes palavras-chaves na base de dados do *Web of Science Core Collection*: ‘Risk Assessment’, ‘Transformer’, ‘Consequence’, ‘Mitigation’ and ‘Risk Management’, onde foram encontrados 97 trabalhos após um processo de filtragem como sendo, artigos somente em inglês, na área engenharia principalmente a elétrica, em um período de 10 anos (2013 – 2023). Os artigos selecionados foram os que mais tinham proximidade com o tema proposto pelo trabalho, envolvendo acidentes em transformadores, gerenciamento de risco, multidimensionalidade do risco em transformadores e que abordassem as metodologias HAZOP e MHAZOP.

3.1. GERENCIAMENTO DE RISCO EM TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

Segundo o estudo realizado por Bracale *et al.* (2019), algumas empresas enfrentam dificuldades para realizar a priorização das atividades de gerenciamento de riscos em transformadores de potência. Os recursos que são em grande parte limitados dificultam o processo de gestão da priorização dessas atividades, e quando não existe uma priorização adequada desses recursos consequentemente a manutenção será não programada, ocorrendo maior indisponibilidade do sistema e aumento de despesas. A priorização dessas atividades de manutenção fornece esse direcionamento para o planejamento das ações necessárias.

De acordo com Medina *et al.* (2017), um método para avaliar o índice de risco em um parque de transformadores de potência, é uma métrica que permite ao administrador do local garantir uma satisfatória gestão do patrimônio físico, alocando adequadamente recursos financeiros e humanos nas ações de operação e manutenção. A avaliação do índice de risco requer o cálculo de dois subíndices secundários denominados probabilidade de falha e fator de consequência. Esses índices são integrados ao valor do índice de risco.

García *et al.* (2021) afirmam que as redes de distribuição elétrica muitas vezes são inadequadas para atender à crescente demanda de carga e para permitir novas instalações de recursos de energia distribuída. Essa inadequação pode resultar na atualização dos transformadores existentes ou na desconexão de toda a carga durante os picos de demanda e no

desperdício de uma parte do total de energia renovável produzida durante condições climáticas favoráveis. Aumentar a capacidade dos componentes da rede de distribuição elétrica é, portanto, obrigatório para evitar essas circunstâncias negativas, no entanto, a substituição de linhas e transformadores é cara e, muitas vezes, os benefícios não compensam os investimentos. Felizmente, a capacidade das redes de distribuição pode ser desbloqueada gerenciando os componentes elétricos por suas classificações dinâmicas, permitindo operá-los mesmo além de sua capacidade nominal por um intervalo de tempo limitado.

No estudo, realizado por Mehairajan *et al.* (2015), mostra que o setor de concessionárias de energia elétrica está enfrentando imensas mudanças em suas atividades de operação e gestão devido à desregulamentação da estrutura de mercado. Imensos desafios são colocados às concessionárias de redes de transmissão e distribuição de energia em decorrência da reestruturação e desregulamentação desse setor. Tradicionalmente, antes da reestruturação e desregulamentação, as concessionárias de rede eram protegidas de desafios por causa de seu status de monopólio natural. Isso levou as concessionárias de rede a desenvolverem estratégias que nem sempre eram ótimas. Portanto, a gestão de ativos é vista como um método essencial para garantir o controle, obter conhecimento e melhorar a tomada de decisões enquanto essas mudanças ocorrem. Já a gestão de risco é vista como um regime dominante para permitir que a gestão de ativos cumpra os direcionadores mencionados, porque o risco fornece uma dimensão analítica com as características de ser comparável, mensurável e gerenciável. Além disso, o gerenciamento de manutenção é uma parte essencial, pois forma os meios para rastrear e garantir o desempenho mensurável do ativo durante todo o ciclo de vida do ativo. Neste estudo foi utilizado o método de Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) incorporado ao risco com base nos princípios gerais de gerenciamento de risco corporativo. No método desenvolvido, a abordagem tradicional de número de prioridade de risco (RPN) usada em estudos de RCM foi expandida para lidar com as consequências dos modos de falha de ativos em vários valores de negócios corporativos.

Olmo *et al.* (2022) observaram que em meio às novas técnicas voltadas para a melhoria da eficiência de refrigeração e isolamento e projeto de transformadores elétricos, condicionadas pelas tecnologias atuais, uma das mais promissoras é a substituição de óleos dielétricos tradicionais por nano fluidos. Pesquisas sobre nano fluidos para sua aplicação em transformadores como refrigerante e meio dielétrico foram realizadas nas últimas duas décadas. Assim, o uso de nano fluídos dielétricos em transformadores pode permitir que essas máquinas

operem com mais segurança ou acima de seus parâmetros de projeto, reduzindo o risco de falha nas redes elétricas e aumentando seu tempo de vida útil.

Bracale *et al.* (2019) falam ainda em seu estudo que o procedimento baseado em risco desenvolvido para gerenciar um transformador de distribuição avalia o impacto econômico da sobrecarga do transformador. Este impacto é quantificado pelo custo de rebobinamento do transformador, devido ao envelhecimento insustentável do isolamento. Na prática de aplicações, o envelhecimento do isolamento é quantificado em termos de perda de vida, como uma porcentagem, ou uma proporção, da perda normal de vida. O fenômeno é bastante complexo, e não é fácil de ser modelado como um todo, no entanto, uma abordagem aproximada tradicional consiste em dividir o ponto mais quente do transformador (geralmente está situado em proximidade com as partes superiores dos enrolamentos), e quantificar a perda de vida em função do HST. A aproximação na estimativa do envelhecimento do isolamento por meio dessa abordagem é pequena em comparação à facilidade de implementação e à utilidade prática, sugerindo sua adequação para fins de gestão (em que limites de segurança e outras limitações são geralmente aplicadas para compensar a estimativa erros. Para um transformador de distribuição, a referência HST é definido como a temperatura (em °C) na qual a vida esperada do transformador seja igual à vida normal, onde $t = 180000$ horas é o valor mínimo necessário para transformadores de distribuição.

No estudo realizado por Perin (2014), somente nos últimos 15 anos ou mais, a indústria australiana de transformadores passou por mudanças bastante significativas tanto do lado dos compradores quanto do lado dos fornecedores. Essas mudanças impactam diretamente na gestão do risco técnico por parte dos compradores no processo de aquisição e por parte dos fornecedores no processo de projeto e fabricação. O trabalho descreve essas mudanças, seu impacto nos riscos técnicos e comerciais e sugere como a indústria, se trabalhar em conjunto ao longo do processo, pode gerenciar melhor esses riscos. A revisão do projeto do transformador pode contribuir significativamente na redução e no controle dos riscos técnicos e comerciais de todo o processo.

No trabalho, realizado por Medina *et al.* (2017), é abordado o uso de transformadores de potência pertinentes às redes de transmissão e distribuição que estão ativos com um alto custo de inversão inicial. Que por suas características construtivas se tornam equipamentos muito confiáveis, seu envelhecimento é progressivo e a vida útil de um transformador de acordo com a literatura é de aproximadamente de 40 anos, a depender do seu uso e suas condições de trabalho, porém é importante notar que os transformadores de mediana e alta potência

(potências superiores a 30 MVA) têm tempos de produção que podem durar entre um e dois anos dependendo dos cronogramas dos fabricantes. Os indicadores de risco são medidos quantitativamente que representam o estado da unidade e as consequências da falha dele considerando que o risco de potência dos transformadores pode ser avaliado por meio de dois índices secundários, o primeiro que é o índice de saúde da unidade que representa a probabilidade de que se produza uma falha que obriga a realizar uma manutenção profunda ou substituir a unidade, e o segundo que é o fator de consequências da falha final da unidade. Esses índices secundários devem ser avaliados de forma independente e integrados no índice de risco.

De acordo com o estudo proposto por Nassif e Dong (2020), a população de transformadores residenciais é um tipo crítico de ativo que muitas empresas de energia elétrica têm tentado gerenciar de forma proativa e eficaz para reduzir falhas inesperadas de transformadores e perda de vida que geralmente são causadas por sobrecarga. Dentro do portfólio típico de ativos de energia, o ativo do transformador residencial geralmente é grande em população, tem o projeto de confiabilidade mais baixo, carece de dados de carregamento do transformador e é suscetível a comportamentos de carregamento do cliente, como adoção de recursos de energia distribuídos e veículos elétricos. Pelo lado positivo, a disponibilidade de mais dados de operação de serviços residenciais, juntamente com o avanço das técnicas de análise de dados, forneceu um novo caminho para aprofundar nossa compreensão do risco de sobrecarga de transformadores residenciais estatisticamente. O estudo desenvolve um novo método baseado em dados que combina o modelo de simulação de aumento de temperatura do transformador e perda de vida útil do isolamento com a técnica de análise de agrupamento. Ele avalia quantitativa e estatisticamente o risco de sobrecarga da população de transformadores residenciais em uma área e sugere medidas adequadas de gerenciamento de risco de acordo com os resultados da avaliação. Vários exemplos de aplicação para uma empresa canadense de serviços públicos foram apresentados e discutidos em detalhes para demonstrar a aplicabilidade e a utilidade do método proposto.

Os autores Yu *et al.* (2022) afirmam que o processo de avaliação de risco de transformadores de potência e o índice de grau de perda é difícil de quantificar com precisão devido à influência de fatores incertos, levando ao desvio do julgamento de risco. Para tanto, é proposto um método de avaliação de risco de transformadores de potência baseado na tomada de decisão do número cinza de intervalo de três parâmetros, em primeiro lugar, a probabilidade de falha do transformador é quantificada com base nos resultados da avaliação da condição, em segundo lugar, considerando a incerteza de saída e carga de GD, a transformada Nataf e a

decomposição de Cholesky foram usadas para eliminar a correlação de variáveis aleatórias, e um método de estimativa de três pontos combinado com um modelo de corte de carga DC foi introduzido para calcular a distribuição de probabilidade do grau de perda causado pela falha do transformador. Por fim, o momento de origem de cada ordem foi obtido com base na fórmula de cálculo do valor do risco, e a distribuição de probabilidade do risco foi obtida por meio da expansão da série Cornish-Fisher.

O método de decisão da medida de distância do número cinza do intervalo de três parâmetros foi usado no estudo para julgar o grau de risco do equipamento. Os resultados mostram que o método proposto considera totalmente a influência da incerteza no julgamento do risco do equipamento, e pode realizar o uso completo do número do intervalo de valor do risco do equipamento para julgar o risco e evitar os defeitos de tomada de decisão do método tradicional de quantificação de certos riscos. Enquanto isso, a influência de diferentes fatores nos resultados da avaliação de risco está de acordo com a condição real de operação do transformador. Os resultados também verificam a eficácia e precisão do método proposto, que fornece uma nova ideia de julgamento para avaliação quantitativa de risco para equipamentos de rede elétrica, bem como o transformador (YU *et al.*, 2022).

De acordo com Suwanasri *et al.* (2015), a análise do risco no transformador de potência é um processo essencial para garantir a segurança das pessoas, equipamentos e meio ambiente durante a operação dele, que pode ser realizada seguindo as seguintes etapas:

- Identificação dos perigos: Envolve a identificação de perigos associados ao transformador de potência, como falhas no isolamento, vazamentos de óleo, sobrecarga, curto-circuito, entre outros.
- Avaliação de riscos: Os riscos associados aos perigos identificados são avaliados em termos de sua probabilidade e impacto potencial. Isso pode ser feito através de análises de risco quantitativas ou qualitativas.
- Controle de riscos: Envolve a implementação de medidas de controle para reduzir ou eliminar os riscos identificados. As medidas de controle podem incluir a instalação de sistemas de proteção, manutenção preventiva, treinamento e inspeções regulares.
- Monitoramento e revisão: Envolve o monitoramento contínuo dos riscos associados ao transformador de potência e a revisão regular do processo de avaliação de riscos para garantir que os riscos estejam sendo gerenciados adequadamente.

Além desses passos, Suwanasri *et al.* (2015) observaram que a avaliação de risco no transformador de potência deve levar em consideração as normas e regulamentos de segurança aplicáveis, bem como as características específicas do transformador de potência em questão. A avaliação de risco no transformador de potência é uma prática importante para garantir a segurança durante a operação do equipamento e para minimizar os riscos de acidentes e falhas. A identificação e controle dos riscos associados ao transformador são fundamentais para a segurança do pessoal, equipamentos e meio ambiente.

Corroborando, Zhou *et al.* (2022) destaca que o transformador de potência é uma das instalações mais críticas do sistema de energia, e seu estado de funcionamento impacta diretamente na segurança do sistema de energia. É fundamental pesquisar a avaliação de prioridade de risco das peças do transformador de potência. Para isso, os autores apresentam uma estrutura híbrida de FMEA integrando novas ferramentas de agregação fuzzy hesitante e o método CRITIC (*Criteria Importance Through Inter-criteria Correlation*). Na estrutura descrita, os conjuntos fuzzy hesitantes são usados para representar a incerteza na avaliação de risco e em seguida, um operador HFWA (média ponderada difusa hesitante) aprimorado é adotado para fundir a avaliação de risco para especialistas em FMEA. Essa forma de agregação pode considerar diferentes comprimentos de HFSs e os graus de suporte entre os especialistas em FMEA. Em seguida, o novo operador HFWGA (média geométrica ponderada fuzzy hesitante) com pesos críticos é desenvolvido para determinar a prioridade de risco de cada modo de falha. Este método pode satisfazer a característica multiplicativa do método RPN (número de prioridade de risco) do modelo FMEA convencional e refletir as correlações entre os indicadores de risco. Finalmente, um exemplo real da avaliação de prioridade de risco de peças de transformadores de potência é dado para mostrar a aplicabilidade e viabilidade da estrutura de FMEA híbrida proposta. Estudos de comparação e sensibilidade também são oferecidos para verificar a eficácia da abordagem de avaliação de risco aprimorada no trabalho.

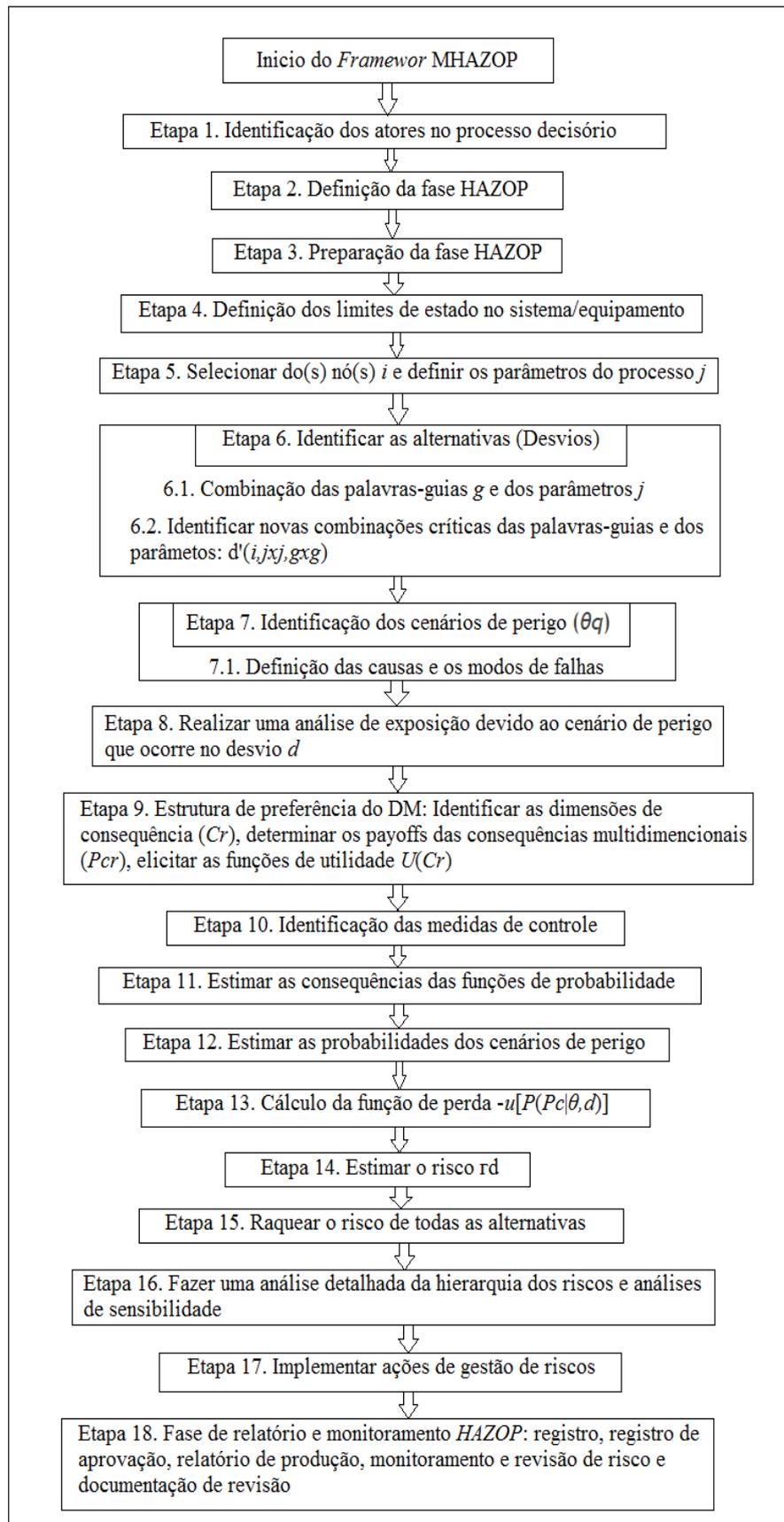
De acordo com Lu *et al.* (2018), um método de avaliação de condição de medição baseado em estatísticas matemáticas para transformadores foi proposto para avaliar o risco operacional sob diferentes dimensões de consequências. A chave para este método é calcular as informações do recurso que pudessem refletir a condição de medição do transformador analisando o valor de amostragem. As informações de características obedecem a distribuições estatísticas específicas em condições normais, onde primeiro, os valores amostrais são truncados por intervalos de tempo iguais, depois as fases iniciais são calculadas e depois diferenciadas. Finalmente, um método de aproximação é usado para eliminar a influência das

flutuações de frequência e as informações de características que obedecem à distribuição normal podem ser obtidas. Quando a condição do transformador se deteriora, os parâmetros de distribuição das informações do recurso mudam. As alterações são identificadas pelo método de estatística matemática para avaliar a condição de medição dos transformadores. Logo, o experimento de verificação é projetado, e os resultados mostram que este método pode efetivamente identificar o ruído de medição do transformador. O estudo fala ainda que os transformadores digitalizam o sinal medido por sequência de tempo, e o processo de digitalização é geralmente chamado de amostragem, onde a taxa de amostragem dos transformadores é geralmente de 4 kHz e o intervalo de amostragem síncrona de 1s em aplicações de engenharia. A chave do método de avaliação da condição de medição proposto pelos autores é calcular as informações de características que podem refletir a condição de medição dos transformadores por meio da análise do valor de amostragem, que normalmente, as informações de características obedecem a distribuições estatísticas específicas.

4. METODOLOGIA MULTIDIMENSIONAL HAZOP (MHAZOP) APLICADA EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Nesta seção será apresentada a metodologia MHAZOP, proposta por Garcez e Alencar (2022), que integra a Teoria da Utilidade Multiatributo (MAUT) com a metodologia HAZOP clássica, que trarão contribuições significativas para o gerenciamento de riscos nos transformadores de potência. Na Figura 2 é apresentado o fluxograma com todas as etapas do MHAZOP, que é composta por dezoito etapas que serão detalhadas a seguir. Concomitantemente, será desenvolvido neste capítulo uma apresentação e a explanação de cada uma das etapas através de um estudo numérico com dados realísticos em transformadores de potência de distribuição média com imersão a óleo de 3000 kVA.

Figura 2 - Fluxograma representando as etapas do MHAZOP



Fonte: Adaptado de (GARCEZ; ALENCAR, 2022)

4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DA APLICAÇÃO NUMÉRICA COM DADOS REALÍSTICOS

Esta seção trata-se da contextualização da aplicação numérica com dados realísticos no transformador de potência que foi alvo do estudo e seus aspectos nas vantagens e perspectivas na análise do MHAZOP.

O gerenciamento de riscos em transformadores de potência é uma área crucial dentro da indústria elétrica, visando identificar, avaliar e mitigar os diversos riscos associados ao funcionamento desses equipamentos vitais para o fornecimento de energia elétrica. Transformadores de potência desempenham um papel fundamental na transmissão e distribuição de eletricidade, convertendo tensões para garantir a eficiência e a segurança do sistema elétrico como um todo. No entanto, devido à natureza complexa e crítica desses dispositivos, eles estão sujeitos a vários riscos que podem ter impactos significativos na confiabilidade do fornecimento de energia, na segurança pública e no funcionamento econômico. Desta forma, torna-se essencial para garantir a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, a segurança das comunidades e a eficiência operacional. A compreensão dos riscos envolvidos, a implementação de práticas de manutenção adequadas e a adoção de tecnologias avançadas são aspectos cruciais desse processo, visando mitigar os impactos adversos e promover a continuidade do sistema elétrico (POISS; VITOLINA; MARKS. J, 2016).

O transformador que será utilizado na aplicação numérica com dados realísticos será o transformador de potência com imersão a óleo de 3000kVa, que também são conhecidos como transformadores de óleo, que são um tipo comum de transformador usado na indústria elétrica. Eles desempenham um papel vital na transmissão e distribuição de eletricidade, convertendo tensões para garantir a eficiência e a segurança do sistema elétrico. A imersão em óleo é uma característica distintiva desses transformadores e oferece várias vantagens em termos de resfriamento, isolamento elétrico e proteção.

Durante o funcionamento do transformador elétrico, este pode atingir altas temperaturas, e seu aquecimento pode ser perigoso e contribuir para perdas de energia durante o processo de transformação. Para solucionar este problema, é adicionado óleo mineral ao transformador, onde os enrolamentos e o núcleo ficam imersos em um tanque repleto de óleo mineral, que tem por função isolar e resfriar o núcleo, que por sua vez é completamente vedado, composto por aletas com a finalidade de realizar a troca de calor com o meio ambiente por condução e convecção. O óleo mineral deve ser constantemente monitorado, e o principal

indicador que é monitorado neste caso (através de uma análise cromatográfica) é a rigidez dielétrica, além do índice de neutralização, teor de água e tensão interfacial (BERNARD; CUCEK, 2017).

Dentre todos os aspectos dos transformadores de potência com imersão a óleo, pode-se destacar as mais comuns, tais como: o isolamento e resfriamento, onde o óleo isolante dentro do transformador atua como um isolante elétrico e como meio de resfriamento. Ele ajuda a isolar os enrolamentos internos e outros componentes elétricos, evitando descargas elétricas indesejadas, além disso, o óleo dissipa o calor gerado durante a operação, mantendo o transformador dentro das temperaturas operacionais seguras (NÉMETH; EKONOMOU, 2020).

Outro aspecto importante é a transferência de calor, na qual o óleo dentro do transformador transfere o calor gerado durante o funcionamento dos enrolamentos e do núcleo para a superfície externa do transformador, conseqüentemente, pode ser dissipado de maneira mais eficiente por meio da convecção natural ou de radiadores externos. Existe também o isolamento dielétrico, que ocorre quando o óleo isolante proporciona um isolamento dielétrico eficaz entre as partes energizadas do transformador, isso ajuda a prevenir curtos-circuitos e descargas elétricas, garantindo a segurança operacional do equipamento (BERNARD; CUCEK, 2017).

A proteção contra corrosão é outro aspecto onde o óleo também atua como uma barreira protetora contra a corrosão dos componentes internos do transformador, prolongando sua vida útil. O que por sua vez necessita de um árduo monitoramento de qualidade do óleo. Desta forma, a qualidade do óleo deve ser monitorada regularmente para garantir que esteja em boas condições, podendo ser utilizados testes de análise do óleo para identificar a presença de contaminantes, umidade ou degradação do óleo, permitindo intervenções de manutenção preventiva.

Por fim, a manutenção e a recuperação em caso de problemas, como vazamentos de óleo ou deterioração do isolamento também são aspectos bem válidos. Os transformadores podem ser submetidos a processos de manutenção, incluindo a substituição ou o tratamento do óleo (BERNARD N.; CUCEK, 2014).

Embora os transformadores de potência com imersão a óleo tenham sido amplamente usados no passado, novas tecnologias, como os transformadores secos e transformadores com líquidos isolantes alternativos, estão sendo desenvolvidas para atender a requisitos ambientais mais rigorosos e para evitar a potencial contaminação do solo e da água associada ao vazamento de óleo. No entanto, os transformadores de óleo ainda são essenciais em muitas aplicações e

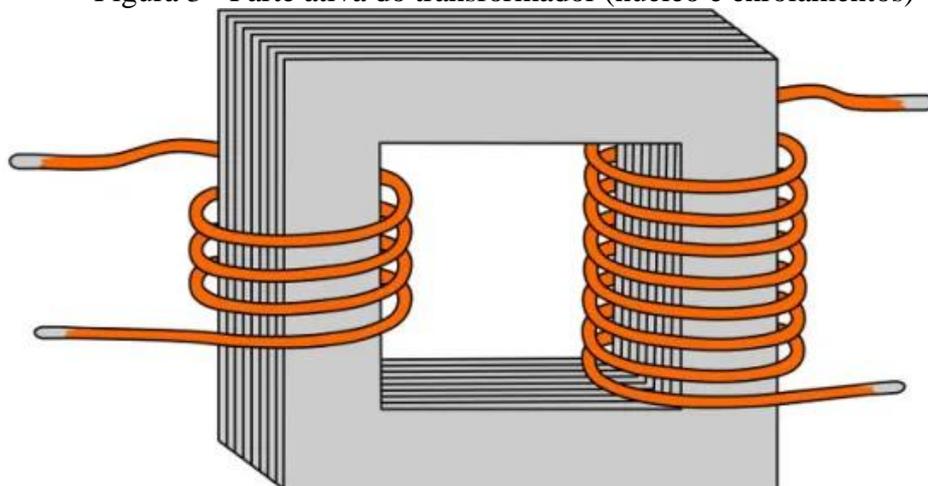
continuam sendo uma peça fundamental da infraestrutura elétrica global (HAJJAR; ALSOMALI, 2017).

No que se diz respeito as vantagens na utilização do transformador com imersão a óleo podem-se dizer que ele é um item que é facilmente encontrado no mercado, pois possui muita resistência mecânica e tem uma grande gama de fabricantes. As principais vantagens da utilização desse tipo de transformador estão no baixo custo do equipamento; a necessidade de pouca manutenção, que se torna simples de ser executada; o equipamento possui alta durabilidade, ou seja, uma vida útil maior e por fim ele possui uma grande facilidade de instalação, gerando assim menos custos para a empresa responsável (LI *et al.*, 2023).

Sob a perspectiva da análise do MHAZOP, especificamente na Etapa 5, esse tipo de transformador pode-se identificar inúmeros subsistemas (nós). Porém, para esta aplicação numérica com dados realísticos será escolhido o “nó” que diz respeito a parte ativa pré-definida na seção anterior. Logo, se atentará a parte onde se localizam o núcleo e os enrolamentos do equipamento, cada um será detalhadamente descrito a seguir.

A parte ativa do transformador de potência é composta pelos componentes que realizam as principais funções de transformação de tensão e transferência de energia. Esses componentes são responsáveis por transferir a energia elétrica de um enrolamento para outro, permitindo a transmissão eficiente de eletricidade em diferentes níveis de tensão. A parte ativa do transformador inclui principalmente o núcleo magnético e os enrolamentos (Figura 3) (TEE; LIU; WANG, 2017).

Figura 3 - Parte ativa do transformador (núcleo e enrolamentos)



Fonte: Adaptado de (PANTERI R.; ENGENHARIA 360, 2023)

O núcleo magnético é geralmente feito de lâminas finas de aço silicioso, empilhadas e isoladas entre si, por um revestimento isolante, geralmente de óxido de ferro ou verniz, para evitar que as correntes parasitas circulem nas lâminas, criando lacunas entre elas para reduzir a continuidade do circuito magnético. Ele forma a estrutura central do transformador e é projetado para guiar o fluxo magnético gerado pelos enrolamentos. A sua eficiência aumenta, reduzindo as perdas magnéticas que podem ser perdas de histerese e por correntes parasitas, à medida que o fluxo magnético alterna durante o ciclo de operação (GARG *et al.*, 2019).

O núcleo pode ter várias formas, sendo as mais comuns as formas de "E", "I" e "U". A forma é projetada para otimizar o fluxo magnético e reduzir as perdas magnéticas, as formas "E" e "I" são frequentemente usadas em transformadores monofásicos, enquanto a forma "U" é comum em transformadores trifásicos (TEE; LIU; WANG, 2017).

O núcleo é projetado para permitir a ventilação e o resfriamento adequados. Isso é especialmente importante, pois o núcleo também pode aquecer durante a operação, onde o calor gerado pelo fluxo magnético é dissipado para o ambiente, ajudando a manter o transformador em temperaturas operacionais seguras. Também foi projetado para minimizar as tensões induzidas nas partes não energizadas do transformador, o que ajuda a evitar descargas elétricas indesejadas e garante a segurança (GARG *et al.*, 2019).

Os enrolamentos são bobinas de fios condutores que são envolvidos em torno do núcleo magnético, eles são um dos principais elementos de um transformador pois desempenham um papel crucial na transferência de energia elétrica com eficiência e segurança, permitindo a interconexão de sistemas elétricos de diferentes tensões e atendendo às necessidades de consumo de energia em diferentes locais (GOEL *et al.*, 2016).

Existem dois tipos principais de enrolamentos que são o enrolamento primário e secundário. A qual o primário está conectado à fonte de energia elétrica original, muitas vezes na rede de transmissão de alta tensão, e é responsável por receber a energia elétrica da fonte e transmitir essa energia para o enrolamento secundário por meio do fluxo magnético no núcleo. A corrente flui por esse enrolamento, criando um campo magnético no núcleo magnético do transformador, onde a intensidade desse campo magnético é diretamente proporcional à corrente no enrolamento primário (BELMILOUD; RAISON, 2014).

O enrolamento secundário é o que está conectado ao destino da energia elétrica, frequentemente na rede de distribuição de baixa tensão, o campo magnético gerado pelo enrolamento primário induz uma tensão no enrolamento secundário de acordo com a lei da indução eletromagnética de Faraday, ele recebe a energia do enrolamento primário por meio do

fluxo magnético induzido no núcleo. A combinação do núcleo magnético e dos enrolamentos permite que o transformador cumpra sua função principal de transformar tensões e transferir energia de forma eficiente e segura, e a relação entre o número de espiras nos enrolamentos primário e secundário determina a relação de transformação, que define como a tensão e a corrente são convertidas de um lado para o outro. A escolha do número de espiras e do projeto do transformador depende das exigências da rede elétrica e das aplicações específicas (BELMILOUD; RAISON, 2014).

4.2. ETAPAS DA ANÁLISE

Nesta seção serão apresentadas e descritas as dezoito etapas que compõe a metodologia MHAZOP.

4.2.1. DEFINIÇÃO DO DECISOR

Nesta etapa é definida quem será o tomador de decisão (DM). Este ator exerce o principal papel no processo de decisão. Ele possui o poder e, conseqüentemente, a responsabilidade pela decisão, da qual deve refletir a sua estrutura de preferências. Além disso, é o decisor que é responsável pelas conseqüências geradas pela decisão. Em vista disso, é considerável destacar que as preferências do decisor devem retratar as preferências e objetivos não somente da organização, mas também da gestão, da qual é responsável por toda e qualquer conseqüência dessa decisão.

Considerando que esta aplicação numérica é realizada através de dados realísticos, na qual se trata de um método de aprendizado que utiliza técnicas elaboradas com o intuito de produzir cenários próximos da realidade para que haja uma interação do pesquisador com o meio de aprendizagem e aplicação do conhecimento à prática. Portanto, neste estudo em específico, foi definido que o DM será o próprio autor deste trabalho, com o auxílio de especialistas sobre sistemas elétricos, que possuem o conhecimento necessário para auxiliar o processo de geração de conhecimento e, conseqüentemente, no processo de tomada de decisão.

No entanto, em uma aplicação numérica com dados realísticos, o decisor poderia ser um gestor que é responsável pela operação, manutenção ou gerenciamento de risco do sistema elétrico, especificamente o ativo, transformadores de potência. Nesta etapa é importante identificar quem é o responsável pelo processo de decisão e quem “sofre” as conseqüências advindas por uma decisão tomada. Neste caso, dependendo do organograma de responsabilidades de cada empresa, pode ser diferentes pessoas.

Além disso, em diversas situações pode-se destacar que o processo de decisão não tenha somente um único decisor. Para isso, a modelagem deve considerar aspectos inerentes ao processo de decisão em grupo, que se torna diferente quando se tem somente um decisor. Para o método MHAZOP, considera-se a perspectiva de somente um único decisor, isto é, considera-se somente uma estrutura de preferência, que normalmente deve refletir a estrutura de preferência da organização.

4.2.2. DEFINIÇÃO DO ESCOPO DO MHAZOP

Nesta etapa, o objetivo é definir o propósito e o escopo do estudo, bem como os principais objetivos previamente estabelecidos pelo decisor (DM). Além disso, é importante selecionar a equipe que participará da análise. A elaboração da declaração de propósito, escopo e objetivos é fundamental para garantir a eficácia da análise no estudo HAZOP (BAYBUTT, 2015). Para alcançar esse objetivo, as abordagens dos Métodos de Estruturação de Problemas (*Problem Structuring Methods* – PSM) podem ser úteis e apoiar essa fase (RALPH L.; KEENEY, 1992; ROSENHEAD J.; MINGERS J., 2001).

Nesta aplicação numérica com dados realísticos, o principal objetivo previamente definido é encontrar os riscos em transformadores de potência imersos a óleo para dessa forma evitar possíveis acidentes. Desta forma, a pesquisa dá-se início pelo propósito principal do estudo que se concentra em eliminar ou reduzir ao máximo os desvios encontrados em transformadores de potência e gerenciar os riscos multidimensionais encontrados nesse tipo de equipamento, e dessa forma, buscar as causas dos riscos das falhas, as dimensões das suas consequências e propor planos de mitigação e manutenção adequada para cada situação, priorizando os problemas com o maior impacto na distribuição de energia elétrica.

4.2.3. FASE DE PREPARAÇÃO

Nesta etapa busca-se prescrever atividades como estabelecer a melhor forma de: realizar o planejamento do estudo, coletar dados, escolher o método de registro, estimar o tempo necessário para desenvolver o estudo e definir o cronograma das atividades a serem realizadas.

Portanto, busca-se nesta etapa identificar o propósito da planta/sistema, reunir informações sobre o sistema como diagramas, fluxo de processos, layout da planta, propor uma divisão da planta em seções onde são identificadas as variáveis de processo e desvios da operação normal.

Para isso, buscou-se através da fundamentação teórica e revisão da literatura conhecimento acerca do funcionamento dos transformadores de potência.

Por fim a esta etapa foi estimado o tempo necessário para desenvolver o estudo como sendo de 48 semanas, a definição do cronograma das atividades de pesquisa a serem realizadas foi proposta como sendo semanalmente, onde neles eram apresentadas pelo autor aos especialistas as seções que haviam sido trabalhadas durante a semana e suas devidas correções a serem realizadas, e dessa forma então seguir para a seção seguinte e assim sucessivamente até a finalização do estudo.

4.2.4. DEFINIÇÃO DOS LIMITES DE APLICAÇÃO

A Etapa 4 é utilizada para definir quais sistemas e processos de produção (nós) entrarão no estudo MHAZOP. Para isso, o que precisa ser feito é definir o nível de análise, que estabelecerá a profundidade da análise no sistema, definindo assim quais critérios serão utilizados para selecionar sistemas/processos prioritários. Isto deve ser conduzido de acordo com o conjunto de objetivos definidos, anteriormente, pelo DM, que pode envolver múltiplos objetivos. Portanto, os modelos de Tomada/Auxílio à Decisão com Critérios Múltiplos (MCDM/A) enquadram-se neste problema de decisão (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Como escopo define-se encontrar os desvios da parte ativa do transformador. A parte ativa do transformador de potência é essencial para o funcionamento adequado do equipamento, além de ser de fundamental importância para compreender e otimizar o desempenho deste dispositivo crucial na distribuição de energia elétrica, deve ser projetada e construída com precisão para garantir a eficiência e confiabilidade do transformador, evitando possíveis tragédias como explosões e incêndios. Além disso, a manutenção adequada da parte ativa do transformador é crucial para prolongar sua vida útil e minimizar o risco de falhas, evitando assim paradas indesejadas no processo.

A parte ativa do transformador é, principalmente, composta pelo núcleo e pelos enrolamentos primário e secundário.

4.2.5. DEFINIÇÃO DE NÓS E PARÂMETROS

Nesta etapa são selecionados os “nós” (i) e os “parâmetros” (j), conforme especificado pela metodologia HAZOP clássica. Os “nós” são definidos como os subsistemas do transformador: (i_1) parte ativa, (i_2) acessórios, (i_3) preservação do óleo, (i_4) arrefecimento,

sendo assim cada um analisado separadamente, tornando-se necessária uma visão holística do equipamento.

Após isso são definidos os “parâmetros” do processo que são pressionados a corresponder a avaliação do transformador, demarcando a profundidade do trabalho. Os parâmetros estabelecidos no “nó” escolhido (parte ativa), que é composto pelo núcleo e enrolamentos foram: (j_1) vibração, (j_2), fluxo (j_3) teor de umidade, (j_4) estanqueidade, (j_5) frequência de sobrecargas, (j_6) níveis de oxigênio, (j_7) intensidade de corrente parasita, (j_8) concentração de gases dissolvidos (j_9) temperatura do óleo e (j_{10}) curto-circuito.

De início, este estudo será abordado apenas cinco dos parâmetros (j) mencionados acima, visto que são os mais comuns e de certa forma os mais importantes para a análise de risco desenvolvido no presente trabalho. No entanto, em uma aplicação numérica com dados realísticos, talvez seja bastante prudente analisar todos os parâmetros identificados anteriormente.

O parâmetro vibração (j_1) trata-se de é uma consideração importante para garantir o funcionamento seguro e eficiente desses equipamentos e pode afetar a integridade estrutural do transformador, bem como seu desempenho elétrico ao longo do tempo. A vibração excessiva pode levar a tensões e tensões alternadas nas partes estruturais, causando fadiga e desgaste ao longo do tempo. Isso pode resultar em rachaduras, deformações ou falhas nas partes do equipamento, comprometendo sua segurança e confiabilidade. No isolamento elétrico, as vibrações podem afetar os materiais isolantes utilizados no transformador, isso é particularmente preocupante para os isolantes sólidos ou líquidos presentes entre os enrolamentos e outras partes, e vibrações constantes podem causar fissuras ou desgaste nos materiais isolantes, o que pode levar a falhas dielétricas e curtos-circuitos internos.

A vibração também pode afetar a eficiência do sistema de resfriamento do transformador, se essas causarem deslocamento ou obstrução de componentes como radiadores ou sistemas de resfriamento a óleo, a dissipação térmica do transformador pode ser comprometida, podendo levar a um superaquecimento, reduzindo a vida útil do equipamento e aumentando o risco de falhas.

A vibração também está relacionada ao nível de ruído gerado pelo transformador, vibrações intensas podem resultar em ruídos audíveis, o que pode ser um incômodo em ambientes próximos. Além disso, o ruído também pode ser um indicativo de problemas mecânicos ou elétricos.

Para lidar com o problema da vibração em transformadores, os fabricantes geralmente projetam transformadores resistentes a vibrações e adotam técnicas de amortecimento, isso pode incluir a utilização de materiais isolantes flexíveis, projetos estruturais que absorvem vibrações e o uso de sistemas de isolamento e fixação adequados. Além disso, a localização adequada do transformador também é importante para reduzir a exposição a fontes de vibração, como tráfego intenso ou máquinas industriais próximas.

O parâmetro fluxo magnético (j_2) em um transformador de potência é uma característica fundamental que descreve a quantidade de fluxo magnético que atravessa as partes principais do transformador, tais como o núcleo de ferro e os enrolamentos. O fluxo é essencial para o funcionamento correto do transformador, pois está diretamente relacionado à transferência de energia entre os enrolamentos primário e secundário. A variação do fluxo é responsável por induzir tensões nos enrolamentos, de acordo com as Leis de Faraday da indução eletromagnética. Quando a corrente elétrica passa pelo enrolamento primário, cria um campo magnético que interage com o núcleo e induz um fluxo magnético, esse fluxo por sua vez, induz tensões nos enrolamentos secundários, permitindo a transferência de energia.

A relação de transformação é diretamente influenciada pelo fluxo magnético, ela se dá entre as tensões do enrolamento primário e secundário, e se o fluxo magnético se mantiver constante e a relação de transformação permanecer a mesma, a tensão no enrolamento secundário será proporcional à tensão no enrolamento primário.

No entanto, o fluxo magnético não pode aumentar indefinidamente no núcleo de ferro do transformador, pois à medida que o fluxo magnético aumenta, pode atingir um ponto de saturação, no qual o núcleo não consegue mais acomodar um aumento significativo no fluxo magnético, e isso pode ocorrer devido às propriedades magnéticas do material do núcleo. A saturação pode resultar em distorção das formas de onda de tensão e corrente, o que pode afetar negativamente o desempenho do transformador, e para garantir o funcionamento eficiente e seguro do transformador, o fluxo magnético precisa ser controlado, isso é feito por meio de projetos de núcleo apropriados, seleção de materiais magnéticos adequados e monitoramento das condições de operação.

Transformadores podem ser equipados com dispositivos como reguladores de tensão ou *tap-changers*, que permitem ajustar a relação de transformação e, conseqüentemente, o fluxo magnético, que também está relacionado às perdas no transformador, como perdas por histerese e correntes parasitas. Essas perdas podem contribuir para a ineficiência do equipamento e resultar em aquecimento excessivo.

O parâmetro teor de umidade (j_3) é um parâmetro crítico a ser considerado na operação e manutenção dos transformadores, a umidade excessiva pode afetar negativamente o desempenho e a confiabilidade desses equipamentos. A umidade pode entrar em um transformador de várias maneiras, como infiltração de água da chuva, condensação de umidade do ar e vazamentos de juntas ou vedações defeituosas, a sua presença torna-se preocupante porque a água é um isolante elétrico menos eficiente do que os materiais isolantes sólidos ou líquidos presentes no transformador, e isso pode resultar em redução da capacidade de isolamento e aumento do risco de falhas elétricas.

A umidade pode causar vários problemas no transformador, incluindo redução da rigidez dielétrica, deterioração dos materiais isolantes e formação de corrosão. Dessa forma, o enfraquecimento da capacidade dielétrica pode levar a descargas parciais e, em casos extremos, a falhas no isolamento, causando curtos-circuitos ou falhas no transformador.

A umidade também pode acelerar o envelhecimento dos materiais isolantes do transformador, isso ocorre porque a presença de umidade pode promover reações químicas indesejáveis nos materiais isolantes, levando a uma degradação mais rápida ao longo do tempo, e o envelhecimento acelerado pode levar a uma vida útil reduzida do transformador. E devido aos riscos associados à umidade, os transformadores são frequentemente equipados com sistemas de monitoramento e isso pode envolver a instalação de sensores de umidade nos enrolamentos e no óleo isolante.

Esses sensores monitoram os níveis de umidade ao longo do tempo, permitindo que os operadores acompanhem as condições do equipamento e tomem medidas de manutenção quando necessário. Se níveis excessivos de umidade forem detectados, podem ser necessárias medidas de tratamento e secagem, e isso pode envolver a aplicação de calor controlado ou vácuo para remover a umidade do isolamento, neste viés torna-se importante que esses procedimentos sejam realizados por profissionais qualificados, pois a aplicação incorreta de calor ou vácuo pode causar danos adicionais ao transformador.

O parâmetro estanqueidade (j_4), ou seja, a capacidade de um transformador de potência em manter-se hermeticamente fechado e impedir a entrada de agentes externos, como umidade, poeira e contaminantes, é um parâmetro crítico para garantir a confiabilidade e a vida útil desse equipamento, e manter um transformador hermeticamente selado é importante para preservar suas propriedades isolantes e garantir o funcionamento seguro e eficiente ao longo do tempo.

Transformadores são equipamentos sensíveis e complexos, com materiais isolantes que podem ser afetados negativamente pela umidade, poeira, gases corrosivos e outros contaminantes, e manter o transformador hermeticamente fechado é essencial para protegê-lo desses elementos externos, que podem prejudicar o isolamento, causar corrosão e acelerar o envelhecimento dos materiais.

A entrada de umidade ou contaminantes no transformador pode afetar diretamente a qualidade do isolamento, uma umidade excessiva pode reduzir a rigidez dielétrica dos materiais isolantes, aumentando o risco de falhas elétricas, e poeira e partículas podem comprometer a eficiência do isolamento, criando caminhos condutivos que podem resultar em descargas parciais e falhas no isolamento.

Materiais isolantes sujeitos a condições adversas podem se degradar mais rapidamente, levando a uma redução na vida útil do transformador e aumentando a probabilidade de falhas. Dessa forma, a estanqueidade deve ser monitorada regularmente, e isso pode ser feito através de inspeções visuais, testes de resistência dielétrica e análise do óleo isolante. Se forem identificados vazamentos ou problemas de estanqueidade, ações de manutenção, como reparos nas juntas, substituição de gaxetas ou selantes, devem ser realizadas para restaurar a sua integridade.

O parâmetro frequência de sobrecargas (j_5) não é um parâmetro convencionalmente associado aos transformadores. Em geral, as sobrecargas se referem a correntes ou cargas elétricas que excedem a capacidade nominal dele, no entanto, a frequência das sobrecargas não é uma característica intrínseca dos transformadores, em vez disso é mais uma questão de operação, gerenciamento de carga e práticas de manutenção. Transformadores têm uma capacidade nominal especificada para a qual foram projetados, essa capacidade é determinada pela corrente elétrica e pela tensão para a qual o ele foi projetado para operar de maneira eficiente e segura, e quando uma carga é aplicada ao transformador que excede sua capacidade nominal, ocorre uma sobrecarga.

Sobrecargas frequentes ou prolongadas podem resultar em aquecimento excessivo no transformador, e isso pode afetar a vida útil do isolamento, deteriorar os materiais e, em última instância, levar a falhas. Aquecimento excessivo também pode causar a degradação do óleo isolante em transformadores de óleo isolante, dessa maneira é crucial operar dentro dos limites de carga especificados. A frequência com que ocorrem sobrecargas não é uma característica do transformador em si, mas sim uma questão de como o sistema elétrico é operado e gerenciado. Uma frequência alta de sobrecargas pode indicar práticas inadequadas de gerenciamento de

carga, falhas no planejamento do sistema elétrico ou capacidade insuficiente para atender à demanda atual.

Para garantir a operação confiável e a longevidade do transformador, é importante gerenciar as cargas de maneira adequada, e isso envolve monitorar as cargas em tempo real, planejar a expansão da capacidade conforme necessário e evitar sobrecargas prolongadas que possam comprometer a integridade do equipamento. Os transformadores geralmente são equipados com sistemas de proteção que monitoram as condições de operação, isso inclui dispositivos de proteção térmica que detectam o aquecimento excessivo e desligam o transformador para evitar danos, além disso, relés de sobrecorrente podem atuar para interromper a alimentação em caso de sobrecarga.

Após percorridos todos os parâmetros vale ressaltar que essa etapa é essencial para evitar análises redundantes do mesmo sistema/processo em diferentes etapas do estudo MHAZOP, ou mesmo para evitar a criação de lacunas no MHAZOP, esquecendo-se de avaliar alguma parte do sistema/processo.

4.2.6. IDENTIFICAÇÃO DOS DESVIOS

Nesta etapa são identificados os desvios (d) aos quais deverão ser analisadas os respectivos níveis de risco. Para isso, são feitas as combinações das palavras-guia (g_n) e os parâmetros (j) para cada desvio ($d_i = (g_n) \times (j_m)$).

Os parâmetros (j_m) do processo referem-se às variáveis do processo que estão sendo avaliados, e que posteriormente serão avaliados em relação à intenção do projeto original condições. As palavras-guia (g_n) HAZOP são alterações que podem ocorrer no processo, que devem ser estabelecidas anteriormente pelos especialistas e/ou DM.

Especificamente nesta aplicação numérica com dados realísticos foram considerados as seguintes palavras-guias: (g_1) mais, (g_2) nenhum, (g_3) menos, (g_4) bem como, (g_5) parte de. Em relação aos parâmetros, inicialmente, considerou-se os seguintes parâmetros: (j_1) vibração, (j_2), fluxo (j_3) teor de umidade, (j_4) estanqueidade, (j_5) frequência de sobrecargas, (j_6) Níveis de oxigênio, (j_7) intensidade de corrente parasita, (j_8) Concentração de gases dissolvidos, (j_9) Temperatura do óleo, (j_{10}) Curto-circuito. A combinação das palavras-guias e parâmetros é mostrado na Tabela 3.

Destaca-se que em uma aplicação numérica com dados realísticos, novas combinações de palavras-guias (g) com novos parâmetros (j) poderiam surgir. No entanto, como o intuito deste trabalho é um estudo da metodologia MHAZOP aplicada em transformadores, este

trabalho irá desenvolver o estudo completo para somente os 15 primeiros desvios encontrados, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 - Aplicação de identificação das alternativas (desvios)

Palavra-guia	Parâmetro	Desvios	Nomenclatura
Mais	Vibração	Aumento de vibração	d_1
Nenhum	Vibração	Ausência de vibração	d_2
Menos	Vibração	Diminuição de vibração	d_3
Mais	Fluxo	Aumento de fluxo	d_4
Nenhum	Fluxo	Ausência de fluxo	d_5
Menos	Fluxo	Diminuição de fluxo	d_6
Mais	Teor de umidade	Aumento do teor de umidade	d_7
Nenhum	Teor de umidade	Ausência do teor de umidade	d_8
Menos	Teor de umidade	Diminuição do teor de umidade	d_9
Mais	Estanqueidade	Aumento da estanqueidade	d_{10}
Nenhum	Estanqueidade	Ausência da estanqueidade	d_{11}
Menos	Estanqueidade	Diminuição da estanqueidade	d_{12}
Mais	Frequência de sobrecargas	Aumento da frequência de sobrecargas	d_{13}
Nenhum	Frequência de sobrecargas	Ausência da frequência de sobrecargas	d_{14}
Menos	Frequência de sobrecargas	Diminuição da frequência de sobrecargas	d_{15}
Bem como	Níveis de oxigênio	Aumento quantitativo de níveis de oxigênio	d_{16}
Parte de	Níveis de oxigênio	Diminuição quantitativa de níveis de oxigênio	d_{17}
Bem como	Intensidade de corrente parasita	Aumento quantitativo de intensidade de corrente parasita	d_{18}
Parte de	Intensidade de corrente parasita	Diminuição quantitativa de intensidade de corrente parasita	d_{19}
Bem como	Concentração de gases dissolvidos	Aumento quantitativo de concentração de gases dissolvidos	d_{20}
Parte de	Concentração de gases dissolvidos	Diminuição quantitativa de concentração de gases dissolvidos	d_{21}
Bem como	Temperatura do óleo	Aumento quantitativo de Temperatura do óleo	d_{22}
Parte de	Temperatura do óleo	Diminuição quantitativa de temperatura do óleo	d_{23}
Bem como	Curto-circuito	Aumento quantitativo de curto-circuito	d_{24}
Parte de	Curto-circuito	Diminuição quantitativa de curto-circuito	d_{25}

Fonte: O autor (2024)

Além disso, conforme recomendado por Garcez e Alencar (2022), é interessante identificar desvios compostos que podem produzir combinações críticas para o sistema em análise. Em outras palavras, além da simples combinação de cada palavra-guia e parâmetro de processo para cada nó (i, j, g) , o que se quer é avaliar a combinação da ocorrência simultânea de múltiplas palavras-guia com múltiplos parâmetros do processo.

4.2.7. IDENTIFICAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PERIGO

Nesta etapa é realizada a identificação dos cenários de perigo $(\theta = \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)$ que contempla os estados da natureza θ , elementos da teoria da decisão, definidos como fatores inerentes ao sistema que escapam ao controle do DM, podendo sofrer variações aleatórias, que impactam na tomada de decisão.

Para o contexto de transformadores pode se ter os seguintes cenários de perigos: (θ_1) vazamento de óleo, causado por corrosão, envelhecimento do isolamento, instalação incorreta, etc., (θ_2) explosões, devido sobrecargas, falha do isolamento, falha do sistema de refrigeração, etc., e (θ_3) incêndios, provocados por falha no sistema de proteção, sobretensão elétrica, falhas de fabricação.

Adjunto a isso, deve-se estabelecer um cenário de funcionamento normal (θ_N) , na qual seria um transformador operando em sua condição perfeita e conseqüentemente não apresentará perdas ou conseqüências.

Lestro (2021) relatou em seu trabalho um caso a ser destacado com acidentes envolvendo transformadores a óleo mineral, que ocorreu em julho de 1990 no estado do Rio Grande do Norte, na qual um transformador da COSERN - Companhia Energética do Rio Grande do Norte explodiu e vazou óleo quente, atingindo uma pessoa durante um comício que ocorria no município de Macau/RN. Devido ao acidente, a vítima ficou marcada por sequelas que necessitam de tratamento especial, limitando-a fisicamente por toda sua vida. A COSERN alegou que a explosão foi causada pelo excesso de carga proporcionada ao sistema por razão do comício, mas a decisão judicial considerou que a empresa seria responsável pela operação do equipamento e controle dos limites possíveis, condenando assim ao pagamento de indenização no valor de cinquenta e cinco mil reais.

Um outro caso emblemático demonstrado por Lestro (2021) para exemplificar o risco associado ocorreu após acidente na subestação elétrica da baixada santista em Cubatão/SP no ano de 2003. Em 07 de março de 2003, houve a ocorrência de falha grave em uma fase vermelha do transformador 03, seguida de incêndio, causando ainda a ruptura do tanque de óleo do

transformador. O acidente gerou a contaminação com óleo mineral de 120 m³ de solo e 160 m³ de água no canal de descarga e no Rio Perequê, localizado ao lado da subestação.

Devido ao forte temporal ocorrido no final da tarde naquele dia, houve o rompimento dos diques de areia causando o derramamento de uma parte do óleo isolante mineral no canal de drenagem e, conseqüentemente, atingindo ao Rio Perequê. Como tentativa de contenção do óleo derramado, foram montados três diques de contenção no canal de drenagem e instalados cinco pontos de barreira naquele rio.

O tratamento do local afetado se deu através do método de biorremediação, recuperando a área afetada sem a necessidade de geração de passivos ambientais, o que fatalmente ocorreria se fossem adotados os métodos convencionais de recuperação ambiental, como incineração ou deposição em aterro. Esta abordagem revelou-se também economicamente vantajosa, tornando-se procedimento padrão para recuperação ambiental em subestações da CTEEP. Apesar de, neste caso, ter sido viável a recuperação ambiental, vale destacar os impactos de custo demandados e o fechamento de parte do local para realização do tratamento.

4.2.8. ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO

Nesta etapa são analisados os objetos que estão expostos aos impactos devido a um determinado cenário de perigo θ ocorrendo. Para cada combinação de cenário de perigo θ e desvio $d(i, j \times j, g \times g)$, modelos matemáticos e aplicações numéricas devem ser aplicados nas diversas características que cercam os objetos expostos à fonte de perigo.

Portanto, deseja-se, por meio de uma abordagem quantitativa, estimar os possíveis impactos nas diversas dimensões de conseqüências como perdas para estruturas e propriedades, o meio ambiente e a saúde e segurança das pessoas, e assim pode-se ter, a depender de sua complexidade matemática, formas de modelagem probabilística que incorporem a visão dinâmica do sistema, ou uma abordagem simplista que possa incorporar a visão determinística da modelagem conseqüências. Portanto, esta etapa irá estimar a zona de perigo, que pode ser determinada pela área ou diâmetro, ou distância da fonte do perigo.

No contexto de transformadores de potência existem diversos cenários de perigo que podem resultar em danos graves ou até mesmo em risco à vida, como por exemplo, sobrecargas, curto-circuito, vazamento de óleo e explosão do tanque. A seguir será analisado cada desvio e alguns de seus cenários de perigo.

O desvio aumento de vibração (d_1) nos transformadores pode ser prejudicial e indicar problemas potencialmente sérios como sobrecarga de corrente que ocorre quando um transformador é operado continuamente com corrente acima de sua capacidade nominal, ele pode superaquecer. Isso pode causar a expansão térmica dos enrolamentos e do núcleo, levando a vibrações adicionais devido ao estresse mecânico. Podendo causar também um curto-circuito repentino e severo que pode criar forças eletrodinâmicas significativas dentro do transformador, causando vibrações violentas, além disso, o curto-circuito pode levar a danos estruturais permanentes (ZOU *et al.*, 2018).

O desvio ausência de vibração (d_2) pode indicar vários cenários de perigo, pois isso pode ser um sinal de que algo está errado com o equipamento ou seu ambiente, como por exemplo a falha de energização, ou seja, se um transformador não está vibrando quando deveria estar em operação, pode ser um sinal de que não está recebendo energia ou que a tensão de entrada está muito baixa, e isso pode levar a uma interrupção no fornecimento de energia e, em casos extremos, à falha do transformador (XU *et al.*, 2018).

O superaquecimento também pode ocorrer devido à ausência de vibrações, que pode indicar que o transformador não está funcionando dentro da faixa de temperatura normal. Isso pode ocorrer devido a problemas no sistema de resfriamento, como falha do óleo refrigerante ou ventiladores. O superaquecimento representa um sério perigo, pois pode levar a falhas catastróficas no transformador, incluindo incêndios. E se houver um curto-circuito interno no transformador, as vibrações podem diminuir ou parar completamente, no entanto, esse é um sinal de perigo iminente, pois os curtos-circuitos internos podem causar arcos elétricos, aumentar a temperatura rapidamente e levar a falhas graves (NASIR; COOB, 2016).

O desvio diminuição de vibração (d_3) nos transformadores geralmente não é um problema, mas pode indicar outros cenários de perigo. O desligamento súbito, que ocorre se o equipamento parar de vibrar repentinamente, isso pode indicar uma falha completa no funcionamento, como um curto-circuito interno ou uma desconexão inesperada da alimentação elétrica. O perigo aqui é a interrupção no fornecimento de energia e a necessidade de identificar e resolver rapidamente a causa do desligamento (ZHU; HAO; LU, 2022).

Outro fator seria a falha do sistema de resfriamento, onde a diminuição das vibrações pode ser causada pelo mau funcionamento do sistema de resfriamento, resultando no superaquecimento do transformador. O perigo é o risco de danos severos ao transformador, falha completa e possíveis incêndios (ZHANG *et al.*, 2011).

O desvio aumento de fluxo (d_4) pode ser perigoso para o transformador, pois pode levar a sobrecargas e danos ao equipamento, onde a corrente elétrica que flui através dos enrolamentos excede sua capacidade nominal, e isso pode causar superaquecimento e deterioração do isolamento, levando a falhas no transformador (CHEN *et al.*, 2016).

A perda de eficiência pode diminuir a eficiência do transformador, já que o núcleo magnético e os enrolamentos podem operar fora de suas condições ótimas, resultando em perdas adicionais de energia e redução da eficiência geral do sistema elétrico. Outro cenário seria o aquecimento excessivo causado pelo aumento de fluxo, onde provoca um aumento nas perdas por efeito Joule nos enrolamentos do transformador, gerando um superaquecimento e pode levar a danos nos materiais isolantes e no óleo dielétrico, causando potenciais falhas catastróficas (PANFILOV; ZHURAVLEV; ASTASHEV, 2019).

O desvio ausência de fluxo (d_5) também pode ser perigoso, pois isso pode indicar problemas significativos no funcionamento do equipamento, como a perda de energia e interrupção no fornecimento, ou seja, se um transformador de potência não está conduzindo nenhum fluxo de corrente, isso significa que a energia elétrica não está sendo transformada e transferida para a carga. Isso pode resultar em uma interrupção no fornecimento de energia para os consumidores, causando inconvenientes, perdas econômicas e, em alguns casos, riscos à segurança, especialmente em situações críticas (DAS; DIVAN; HARLEY, 2010).

A ausência de fluxo também pode causar o desligamento ou falha do transformador pode ser um sinal de que ele não está funcionando corretamente devido a uma falha interna, como um curto-circuito, um problema de isolamento ou uma avaria mecânica. Essa situação pode levar a falhas graves no transformador, incluindo danos estruturais, vazamentos de óleo dielétrico e até mesmo incêndios (DAS; DIVAN; HARLEY, 2010).

Alguns problemas de controle e proteção também pode ser causada por problemas nesse sistema do transformador, pois se os dispositivos de controle, como disjuntores e relés de proteção, falharem em detectar uma condição de falha, isso pode resultar em uma situação perigosa onde o transformador não é desligado adequadamente em caso de problemas elétricos, aumentando o risco de danos ao equipamento e perigos para a rede elétrica.

O desvio diminuição de fluxo (d_6) pode indicar situações de perigo, pois isso pode ser um sinal de problemas operacionais ou falhas no equipamento como a sobrecarga nos enrolamentos do transformador, pois uma corrente menor está passando por eles, e isso pode causar superaquecimento, desgaste prematuro do isolamento e, em casos extremos, falhas no transformador devido a danos térmicos. Outro cenário seria a o desbalanceamento de tensão

nas saídas do transformador, que pode causar operações inadequadas de dispositivos elétricos conectados ao sistema, afetando negativamente a qualidade do fornecimento de energia para os consumidores e causando danos a equipamentos sensíveis (TU *et al.*, 2018).

A ressonância de vibração também pode ser causada por diminuição de fluxo, que pode alterar as características vibracionais do transformador, e se as frequências naturais coincidirem com as frequências harmônicas da rede elétrica ou de cargas conectadas, pode ocorrer ressonância de vibração, podendo levar a vibrações excessivas e aumentar o risco de falhas mecânicas (TU *et al.*, 2018).

É importante enfatizar que a diminuição de fluxo em transformadores de potência não é uma condição normal e geralmente indica a necessidade de investigação e ação imediatas para identificar e resolver a causa subjacente do problema. A manutenção preventiva, o monitoramento contínuo das condições do transformador e a resposta rápida a qualquer diminuição anormal de fluxo são fundamentais para garantir a operação segura e confiável desses equipamentos críticos no sistema elétrico.

O desvio aumento de teor de umidade (d_7) pode ser perigoso, pois a umidade pode comprometer o isolamento elétrico e causar danos ao equipamento, como a redução da rigidez dielétrica no óleo isolante do transformador pode reduzir a rigidez dielétrica do fluido. Isso significa que o óleo se torna menos capaz de resistir a tensões elétricas, o que pode levar a descargas parciais, arcos elétricos internos e até mesmo falhas no isolamento. A perda de rigidez dielétrica representa um risco significativo de danos elétricos ao transformador (CORREIA *et al.*, 2020).

A corrosão e deterioração dos enrolamentos, ou seja, a presença de umidade pode acelerar a corrosão de componentes internos do transformador, como enrolamentos e núcleo magnético, isso enfraquece os materiais estruturais e reduz a vida útil do transformador. A corrosão também pode criar caminhos condutores que aumentam o risco de falhas elétricas (CORREIA *et al.*, 2020).

A formação de gases e pressão interna pode causar a formação de gases, como hidrogênio, metano e etano, devido a processos de degradação. Esses gases podem levar ao aumento da pressão interna dentro do transformador, o que pode resultar em vazamentos, rupturas ou até mesmo explosões. A pressão excessiva pode comprometer a integridade do equipamento e causar danos significativos.

Para mitigar esses perigos, é essencial manter o teor de umidade dentro dos níveis especificados pelo fabricante do transformador. Isso é geralmente alcançado por meio da

manutenção regular do óleo isolante, incluindo a desidratação, filtragem e secagem quando necessário. Além disso, é importante monitorar continuamente as condições do óleo e do transformador para identificar qualquer aumento anormal de umidade e tomar medidas corretivas antes que danos ocorram.

O desvio ausência de teor de umidade (d_8) também pode ser perigosa, pois o óleo isolante é projetado para conter uma quantidade controlada de umidade para manter suas propriedades dielétricas e térmicas. A redução da capacidade de resfriamento, ou seja, a presença controlada de umidade no óleo ajuda na transferência de calor e no resfriamento do transformador e sua ausência pode prejudicar a capacidade do óleo de dissipar o calor gerado durante a operação. Isso pode levar a superaquecimento do transformador e, eventualmente, avarias mecânicas e elétricas (ATTIYAH; ALNUJAIMI; ALGHAMDI, 2019).

O desgaste prematuro dos materiais pode causar o ressecamento dos materiais isolantes, como o papel usado nos enrolamentos dos transformadores, e isso pode levar ao envelhecimento prematuro e ao endurecimento dos materiais, tornando-os menos eficazes na isolação elétrica e menos capazes de absorver choques mecânicos, aumentando assim o risco de falhas. Portanto, manter um equilíbrio adequado no teor de umidade no óleo isolante dos transformadores é fundamental para garantir o desempenho seguro e confiável desses equipamentos. Tanto a presença excessiva quanto a ausência completa de umidade podem ser prejudiciais, e a manutenção preventiva e o monitoramento regular são essenciais para garantir que as condições do óleo e do transformador estejam dentro dos parâmetros especificados pelo fabricante (LI *et al.*, 2021).

O desvio diminuição de teor de umidade (d_9) também pode ser perigoso, pois o óleo desempenha um papel importante na isolação elétrica e no resfriamento do equipamento. A rigidez dielétrica reduzida, pois a umidade no óleo isolante contribui para essa rigidez, ou seja, a capacidade do óleo de resistir a tensões elétricas. Quando o teor de umidade diminui, a rigidez dielétrica do óleo pode ser reduzida, tornando o transformador mais suscetível a descargas parciais, arcos elétricos e outras falhas elétricas (ADIL HABEEB *et al.*, 2020).

O desgaste acelerado dos materiais, onde a falta de umidade pode levar ao ressecamento dos materiais isolantes presentes no transformador, como o papel usado nos enrolamentos. Isso pode resultar em um envelhecimento acelerado dos materiais, tornando-os mais quebradiços e menos eficazes na isolação elétrica. O desgaste acelerado dos materiais aumenta o risco de falhas mecânicas e elétricas no transformador. Portanto, é importante manter um equilíbrio adequado no teor de umidade no óleo isolante dos transformadores de potência.

A diminuição significativa desse teor pode comprometer a integridade e a operação segura do equipamento (ADIL HABEEB *et al.*, 2020).

O desvio aumento de estanqueidade (d_{10}) ou seja, a diminuição da ventilação e da capacidade de liberar gases internos, pode resultar em situações perigosas para esses equipamentos, como sobreaquecimento, em que a ventilação adequada é essencial para o resfriamento eficaz dos transformadores e a sua falta devido ao aumento da estanqueidade pode resultar em superaquecimento do óleo e dos enrolamentos, reduzindo a eficiência do transformador e aumentando o risco de falha (TAKAMI; MAHMOUDI, 2008).

O acúmulo de gases, onde a falta de ventilação adequada pode ser ocasionada, incluindo os produtos de degradação do óleo, dentro do transformador, resultando em condições prejudiciais, como a formação de ácido sulfídrico, que pode corroer os materiais internos e levar a falhas mecânicas e elétricas. Para evitar esses perigos, é importante manter um equilíbrio adequado entre a estanqueidade e a ventilação nos transformadores de potência, isso é geralmente alcançado por meio de projeto adequado, seleção de materiais apropriados para as juntas de vedação e monitoramento regular da pressão interna e das condições do transformador (DAS; GUPTA, 2020).

O cenário de perigo relacionados ao desvio ausência de estanqueidade (d_{11}), ou seja, a incapacidade de manter o óleo isolante e os gases internos completamente contidos, e o desvio diminuição de estanqueidade (d_{12}) estão correlacionados, ambos podem resultar em riscos significativos, como a contaminação do óleo, que pode permitir que contaminantes externos, como umidade, poeira e partículas sólidas, entrem no transformador, e isso pode afetar adversamente a qualidade do óleo isolante e a rigidez dielétrica, aumentando o risco de falhas elétricas (MILOSAVLJEVIC; JANJIC, 2020).

A falta e a diminuição de estanqueidade (d_{12}) também pode levar a vazamentos de óleo isolante do transformador, e isso não apenas resulta na perda do fluido dielétrico, mas também pode causar contaminação ambiental, pois o óleo pode se espalhar pelo solo ou pela água. Além disso, vazamentos de óleo podem aumentar o risco de incêndio e explosões devido à presença de gases inflamáveis no transformador (CORREIA *et al.*, 2020).

Manter a estanqueidade adequada é crucial para garantir a integridade e o desempenho confiável dos transformadores de potência. A manutenção preventiva regular, a inspeção das juntas de vedação e a detecção precoce de vazamentos são práticas críticas para evitar esses cenários de perigo e prolongar a vida útil dos transformadores (ZITONG *et al.*, 2021).

O desvio aumento da frequência de sobrecargas (d_{13}) em transformadores de potência pode levar a sérios problemas e falhas no sistema elétrico, como sobrecargas de curta duração frequentes, onde se tem como causa uma das principais razões para o aumento da frequência de sobrecargas pode ser a crescente demanda de energia em uma rede elétrica ou a instabilidade do sistema. E como perigo sobrecargas frequentes e de curta duração que podem levar ao envelhecimento prematuro do isolamento do transformador, e isso pode resultar em falhas no isolamento, vazamentos de óleo isolante e, em última instância, em falhas catastróficas do transformador (MAHAJAN; ROBALINO; SIVAN, 2010).

Outro problema pode ser a operação em sobrecarga constante, onde a causa as vezes, são as concessionárias que operam transformadores de potência em sobrecarga constante para atender a picos de demanda sem investir em capacidade adicional. Tendo como perigo operar um transformador em sobrecarga constante pode resultar em um aumento da temperatura do óleo isolante e do enrolamento do transformador. Isso acelera o processo de degradação do isolamento e pode causar falhas em componentes críticos do transformador, incluindo as bobinas (ZHALEFAR; PASAND, 2006).

As sobrecargas devido a eventos climáticos extremos também são possíveis, tendo como causa eventos climáticos extremos, como tempestades de gelo, furacões ou ondas de calor, podem levar a sobrecargas nos transformadores, especialmente quando há quedas de árvores ou problemas na rede elétrica. E tendo como perigo sobrecargas causadas por eventos climáticos extremos podem resultar em falhas súbitas do transformador devido ao estresse térmico causado pelo aumento repentino da carga. Além disso, esses eventos podem danificar a infraestrutura da rede elétrica, tornando a recuperação mais demorada e cara (MAHAJAN; ROBALINO; SIVAN, 2010).

Assim, torna-se importante monitorar e gerenciar adequadamente as sobrecargas em transformadores de potência para evitar danos à infraestrutura elétrica, interrupções no fornecimento de energia e custos significativos de reparo ou substituição.

O desvio ausência da frequência de sobrecargas (d_{14}) também pode ser prejudicial, pois os transformadores são projetados para operar dentro de faixas específicas de carga. Quando não estão sujeitos a sobrecargas, podem ocorrer alguns cenários de perigo como o envelhecimento prematuro do transformador, onde a causa seria se um transformador não for submetido a sobrecargas ocasionalmente, ou seja, ele pode operar continuamente em uma faixa de carga muito abaixo de sua capacidade nominal. E como perigo se tem a operação constante em cargas leves que pode levar ao envelhecimento prematuro do transformador. O óleo isolante

e o isolamento dos enrolamentos podem sofrer deterioração devido à falta de calor gerado por sobrecargas controladas, o que reduz a sua vida útil (MARTIN *et al.*, 2017).

A perda de eficiência energética pode ocorrer como causa em transformadores operando com cargas muito abaixo de sua capacidade nominal que podem experimentar uma queda significativa na eficiência energética. O perigo seria a eficiência energética, que é reduzida porque a perda de energia (principalmente em forma de calor) se torna uma porcentagem maior da energia total que flui pelo transformador. Isso resulta em desperdício de energia e aumento dos custos operacionais (ZHANG *et al.*, 2021).

Têm-se também a instabilidade do sistema elétrico, que se causa em situações em que os transformadores não estão sujeitos a sobrecargas, e pode haver uma falta de flexibilidade no sistema elétrico para atender a picos de demanda repentinos. O perigo aparece em casos de aumento súbito da demanda de energia, como durante eventos climáticos extremos ou grandes eventos, a ausência de sobrecargas controladas pode resultar em instabilidade do sistema elétrico, quedas de tensão e interrupções no fornecimento de energia (MARTIN *et al.*, 2017).

Para garantir o desempenho ideal e a vida útil dos transformadores de potência, é importante que eles operem dentro das faixas de carga para as quais foram projetados. Portanto, os transformadores devem ser periodicamente submetidos a sobrecargas controladas e gerenciadas de acordo com as diretrizes de manutenção e operação apropriadas. Isso ajuda a equilibrar a operação do transformador e evitar os perigos associados à ausência de sobrecargas.

O desvio diminuição da frequência de sobrecargas (d_{15}) em transformadores também pode criar cenários de perigo e problemas potenciais, como por exemplo, o acúmulo de umidade e gases no isolamento, onde a causa se dá pela diminuição da frequência de sobrecargas que pode resultar em temperaturas mais baixas dentro do transformador, o que, por sua vez, pode impedir que a umidade presente no óleo isolante e no papel isolante seja evaporada. O perigo está no acúmulo de umidade e a formação de gases, como o hidrogênio, dentro do transformador podem acelerar o processo de degradação do isolamento. Isso pode resultar em falhas dielétricas, arcos elétricos e, em última instância, em falhas catastróficas do transformador (ROSLAN *et al.*, 2017).

Outro efeito seria a redução na capacidade de carga, onde a causa é a diminuição da frequência de sobrecargas que pode levar à subutilização do transformador, fazendo com que ele seja operado constantemente em uma fração de sua capacidade nominal. O perigo se encontra na operação contínua em cargas muito leves que pode reduzir significativamente a eficiência do transformador e, em alguns casos, torná-lo economicamente inviável devido ao

alto custo de manutenção em relação ao benefício proporcionado (ZIOMEK; VIJAYAN; SANDERS, 2014).

Por fim, o risco de falha sob sobrecargas repentinas, o que acontece quando um transformador não é submetido a sobrecargas controladas periodicamente, ele pode não estar preparado para lidar com sobrecargas repentinas e imprevistas. O perigo ocorre quando há situações de aumento súbito de carga devido a eventos como falhas em outros componentes do sistema elétrico ou picos de demanda, o transformador pode não ser capaz de responder adequadamente. Isso pode resultar em sobreaquecimento, falhas de isolamento e interrupções no fornecimento de energia (ROSLAN *et al.*, 2017).

Assim, torna-se importante encontrar um equilíbrio na operação dos transformadores de potência, garantindo que eles sejam periodicamente submetidos a sobrecargas controladas, conforme especificado nas diretrizes de manutenção e operação. Isso ajuda a preservar a integridade do transformador, prolongar sua vida útil e garantir que ele possa responder eficazmente a situações de carga variável no sistema elétrico.

4.2.9. ESTRUTURA DE PREFERÊNCIA DO DM

Nesta etapa deve ser considerada e incorporada a estrutura de preferência do decisor (DM) ao estudo MHAZOP. O DM deve estabelecer os objetivos a serem considerados no estudo. Para cada um desses objetivos, um atributo ou critério deve ser definido. No contexto da gestão de riscos em transformadores, os critérios serão associados às múltiplas dimensões de consequências na modelagem de risco proposta.

Depois de identificadas as dimensões das consequências serão determinados os *payoffs* das consequências multidimensionais, na qual esta etapa é responsável por estimar as possíveis consequências, decorrentes dos cenários de perigos e desvios, em uma zona de perigo previamente estimada.

Em seguida, são eliciadas as funções de utilidade do DM, considerando a utilidade de diferentes desempenhos dos resultados em um critério. O DM consegue expressar as relações de preferências sob uma estrutura de preferência estrita (P) e de indiferença (I), não havendo incomparabilidades, confirmando que as preferências entre as alternativas seguem propriedades de ordenabilidade e transitividade.

Para isso, precisa-se identificar a racionalidade do decisor, que na aplicação numérica com dados realísticos analisada, tem-se uma racionalidade compensatória, visto que um baixo

desempenho em um dos critérios pode ser compensado por outro alto desempenho em outro critério. Característica essa que é refletida pelo método MAUT.

Em primeiro momento, o DM deve identificar as dimensões de consequência (C_r) consideradas no modelo de avaliação de risco. Neste contexto de transformadores pode-se citar alguns exemplos, tais como: interrupção de energia para áreas inteiras; danos à propriedade e ao meio ambiente, como incêndios e poluição do solo e das águas; risco à saúde e à vida das pessoas próximas, incluindo lesões, doenças e morte; custos elevados de reparação e substituição do transformador ou equipamentos circunvizinhos danificados, etc.

Posteriormente, é necessário determinar os *payoffs* das consequências multidimensionais (p_{C_r}) consideradas e elicitare as funções de utilidade $U(C_r)$. Portanto, o DM deve avaliar o sistema e as propriedades básicas das suas preferências e estabelecer o tipo de racionalidade mais adequada à sua estrutura de preferência.

De acordo com o DM, foram admitidos três critérios para o estudo com base nos cenários que mais impactam no contexto de transformadores de potência nos últimos anos:

4.2.9.1. Critério 1 (C_1): Número de fatalidades, envolvendo pessoas que trabalham com transformadores.

Segundo um estudo realizado por (KOUSTELLIS *et al.*, 2013), uma análise foi realizada referindo-se a um acidente real ocorrido na Grécia durante os trabalhos de reparação realizados num transformador de média tensão da *Public Power Corporation* (PPC), onde ao tentar restabelecer a energia elétrica, o eletricista subiu no poste onde estava colocado o transformador e tentou trocar o fusível unipolar. O isolador da fase quebrou, resultando na liberação do fio de distribuição de energia, onde o técnico tocou o fio solto no membro inferior e sofreu choque elétrico.

As fatalidades decorrentes de transformadores de potência são eventos trágicos e infelizes que podem ocorrer em situações de falha grave, operação inadequada, manutenção insuficiente ou outras circunstâncias perigosas envolvendo transformadores de alta potência. Essas fatalidades podem afetar trabalhadores, técnicos de manutenção, operadores de subestações ou até mesmo membros do público em geral, dependendo da gravidade da situação.

De acordo com o anuário estatístico de acidentes de origem elétrica 2023 ano base 2022, pode-se observar o número de fatalidades por choques elétricos por local de ocorrência, e por tornar-se pertinente é observado as localidades de rede aérea de distribuição com um número bastante elevado de fatalidades em um período de 10 anos, contudo concentrando-se

no foco do trabalho observa-se um número bem menor de fatalidades na localidade de subestações e transmissão (onde estão presentes os transformadores de potência). Na Figura 4 encontram-se os dados exposto que foram retirados do anuário.

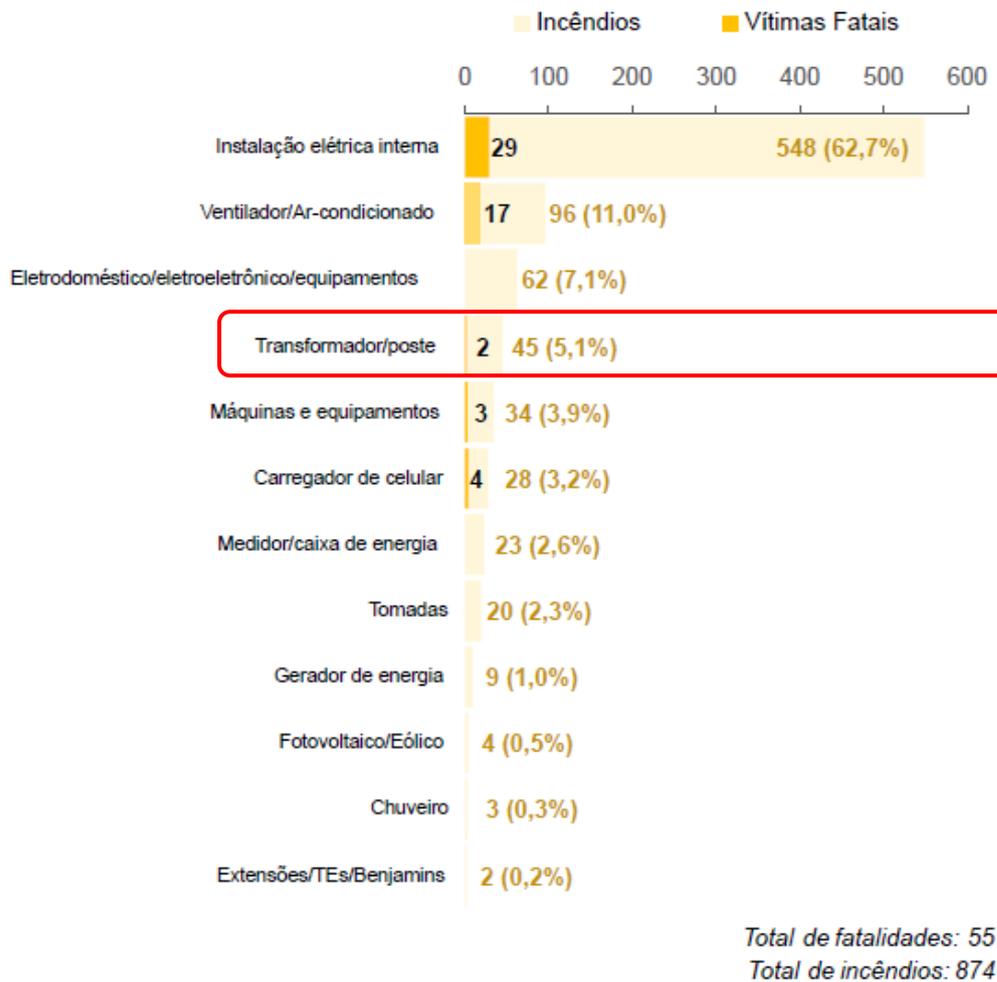
Figura 4 - Mortes por choque elétrico por local de ocorrência (2013-2022)

Localidade	ANO										
	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	
Área rural	75	81	55	69	50	61	48	48	22	54	
Área urbana/ruas/praças/largos	66	112	36	20	49	59	61	25	9	19	
Comércio (pequeno/grande)	44	79	39	37	47	33	45	38	33	29	
Construção civil (interno)	0	0	12	14	16	11	31	21	14	17	
Clube/parque/escola	5	4	3	8	4	9	10	6	5	9	
Igreja/convento/hospitais	0	0	2	8	5	0	6	2	1	9	
Indústria	22	12	19	14	12	16	27	24	35	17	
Rede aérea de distribuição	170	109	213	218	181	172	206	237	297	265	
Subestações/transmissão	6	3	9	0	0	7	4	3	11	8	
Moradias: casas, apto., sítios	198	214	163	173	218	209	228	203	190	128	
Rios, lagos, açudes/praias	3	2	17	26	24	28	24	33	38	37	
Outros	3	11	22	12	21	9	7	51	43	0	
Total	592	627	590	599	627	614	697	691	698	592	

Fonte: (SOUZA *et al.*, 2023)

Outro dado retirado deste mesmo anuário de acidentes está descrito na Figura 5, que mostra com mais especificidade as fatalidades associadas a transformadores, onde se teve duas vítimas fatais no ano de 2022 em uma determinada subestação.

Figura 5 - Fatalidades e incêndios de origem elétrica por equipamento (2022)



Fonte: (SOUZA *et al.*, 2023)

Um outro exemplo ocorrido no ano de 2009 em um pátio de subestação, na cidade de Milagres no Ceará, mostra uma tragédia envolvendo um operador e um montador que estavam a serviço da CHESF, ambos eram bastante experientes, porém perderam suas vidas durante a realização de uma manutenção em uma chave seccionadora em um transformador. Os dois subiram em um dos isoladores que apoiava a lâmina de abertura e fechamento da chave que não suportou a tração e veio a quebrar, caindo sobre os dois e levando-os ao óbito (BASTOS, 2010).

Para mitigar os riscos associados a esse tipo de equipamento e evitar fatalidades, são fundamentais a manutenção preventiva adequada, a formação e treinamento dos trabalhadores em segurança elétrica, o uso de equipamentos de proteção individual (EPIs) apropriados, a implementação de procedimentos operacionais seguros e a conformidade com os padrões e regulamentos de segurança específicos do setor. A segurança é prioridade absoluta quando se trata de lidar equipamentos elétricos de alta tensão.

4.2.9.2. Critério 2 (C_2): Tempo para reestabelecer o sistema à normalidade (*downtime*)

Este critério corresponde ao tempo para reestabelecer o sistema a normalidade após a ocorrência de uma falha (acidente), que pode ocorrer como o equipamento sendo instalado pela primeira vez ou sendo substituído após a falha.

No estudo realizado por Riegler *et al.* (2018) foi comprovado em uma demonstração que foram necessárias cerca de 30 horas de trabalho em três dias úteis para reestabelecer o sistema elétrico como um todo, em que atividades foram realizadas como instalação, testes e energização um banco de transformadores de 345kV, em um total de três unidades monofásicas de 100MVA cada, que funcionaram em operação normal da rede, incluindo condições de sobrecarga.

Segundo Jin *et al.* (2022), o *downtime* no contexto de transformadores de potência, refere-se ao período durante o qual um transformador não está em operação normal devido a manutenção planejada, reparos, inspeções, falhas não planejadas ou outros motivos. Durante o *downtime*, o transformador está desconectado da rede elétrica e não está fornecendo energia. Existem várias razões pelas quais um transformador pode passar por um período de *downtime*, como a manutenção preventiva para garantir a operação segura e eficiente do equipamento. Reparos e modificações, onde em caso de falhas operacionais, danos ou necessidade de modificações no transformador, é necessário desligá-lo da rede para reparos e ajustes. Testes e inspeções, onde periodicamente, é fundamental realizar testes e inspeções detalhadas para garantir o desempenho e confiabilidade, e a substituição ou atualização do equipamento, que em alguns casos pode precisar ser substituído por um modelo mais moderno e eficiente para atender às demandas crescentes de carga ou para incorporar avanços tecnológicos.

4.2.9.3. Critério 3 (C_3): Custo financeiro

Este critério está relacionado aos custos diretos e indiretos, que geram o impacto financeiro, decorrente da ocorrência de uma falha. Por exemplo, custo de substituição de equipamento por outro, custo da perda generalizada da produção e serviço, multas decorrentes da falha gerando a não entrega da energia elétrica aos consumidores, dentre outros.

Sousa (2017) demonstrou que o maior número de reivindicações que vem ocorrendo ultimamente é no setor de subestações elétricas, e que a maior perda financeira devido a falhas em transformadores já registradas foi no ano 2000 em uma usina de geração, que levou a custos de interrupções de negócios superiores a US\$ 86 milhões.

De acordo com a WEG, que é uma empresa global de equipamentos eletroeletrônicos, fundada em 1961 atuando principalmente no setor de bens de capital com soluções em máquinas elétricas e automação, as potências de transformadores a óleo mais usuais variam de 500 a 3000 kVA, e devido ao fato de a maioria dos transformadores citados na literatura serem do tipo de distribuição em usinas elétricas, o transformador de potência a óleo utilizado no trabalho será o de distribuição média de até 3000 kVA, que devido a necessidade de importação pela sua complexidade de fabricação, o valor torna-se algo entre US\$ 1.700,00 à US\$ 3.500,00 a depender das suas condições. Na escala utilizada é realizada a conversão de dólar para real, onde agora o valor torna-se algo entre R\$ 8.279,00 à R\$ 17.045,00, levando em consideração que hoje 1 dólar está custando R\$ 4,87.

4.2.9.4. *Elicitação da função utilidade multiatributo*

A representação tradicional de risco com as probabilidades ou produto de probabilidades de acordo com os valores das consequências podem não representar o comportamento (propensão, neutralidade ou aversão) frente ao risco em relação aos eventos ocorridos mesmo com baixa probabilidade ou que não ofereçam riscos e grandes consequências desastrosas. Desta maneira, torna-se necessária uma abordagem que leve em consideração as preferências do DM (GARCEZ. T. V., 2009). Assim, considera-se funções de utilidade sobre as consequências para incorporar a preferência do decisor ao risco nas perdas que decorre de acidentes com transformadores de potência a óleo.

A própria estrutura axiomática da teoria da utilidade permite a implementação de um processo de entrevista entre o analista de decisão e o decisor como forma de permitir o levantamento das preferências do decisor. O procedimento de elicitación usa a estrutura de axiomas para testar condições de preferências e indicar que caminhos e opções podem ser seguidos. O processo de entrevista deve permitir que o decisor expresse suas preferências de forma mais real possível, de modo que a função utilidade obtida represente uma medida das atitudes do decisor em relação ao risco e situações de incerteza. O decisor deve estar consciente dos objetivos do processo de entrevista e suficientemente motivado para responder e colaborar com os propósitos do trabalho associado ao problema de decisão (DE ALMEIDA, 2013).

Antes da elicitación torna-se necessária um entendimento e aproximação do DM acerca dos conceitos de decisão, da função utilidade e sua estrutura axiomática e loterias. Uma loteria pode-se entender como sendo uma probabilidade $1 - p$ de arriscar para ganhar ou perder um jogo, por exemplo, sendo assim uma incerteza. Após esse entendimento pelo decisor,

estruturou-se o problema de decisão e seu espaço de consequência composto por três dimensões (c_1, c_2, c_3), sendo a dimensão c_1 o critério impacto humano, ou seja (número de fatalidades envolvendo pessoas que trabalham com transformadores), a dimensão c_2 sendo o critério de *downtime* (tempo para reestabelecer o sistema à normalidade) e pôr fim a dimensão c_3 sendo o critério financeiro (falha de custos diretos e indiretos quando unidos ao impacto financeiro que decorre da falha no transformador).

Na medida em que o processo de avaliação de elicitación avança, é perfeitamente aceitável que o decisor sinta necessidade de reavaliar a sua preferência sobre uma consequência. Pode-se dizer que é este um dos objetivos da teoria da utilidade, eliminar as contradições do decisor até que ele sinta que o problema está plenamente estruturado na sua mente. Ao final desse processo, o decisor tem o domínio sobre o espaço de consequências do problema e consegue perceber o quanto cada atributo influencia no processo de decisão.

A determinação da função utilidade será efetuada a partir da avaliação dessas consequências nesse espaço. O analista deve se assegurar de que o decisor compreende o espaço de consequências e em seguida deve estar claro para o decisor que cada ponto representa uma quantidade de cada atributo. Deve ser perguntado ao decisor o que representa a consequência em alguns pontos no espaço. Além disso, é importante que o decisor possa perceber em que direção os atributos aumentam. A limitação da região em que se vai trabalhar é também uma das etapas importantes do processo. As preferências devem ser avaliadas em uma região a menor possível, ou seja, devem ser previamente conhecidos os valores mínimos e máximos de cada atributo.

Para a avaliação intra-critério são calculadas as utilidades de todos os desvios (d) através da função utilidade unidimensional representada por $U(c_1)$, $U(c_2)$ e $U(c_3)$. Estas são as funções das utilidades unidimensionais para as dimensões de risco humano, downtime e financeiro, respectivamente.

A elicitación da função utilidade acontece sob um intervalo fechado de consequências, onde o máximo valor encontrado se delimita a uma consequência com valor 0, ou seja, onde não há impactos, e o mínimo valor pela maior das consequências estimadas, no caso valor 1. É importante enfatizar que embora se possa ter valores discretos e enumeráveis, ou seja, o número de vítimas na consequência humana, os conjuntos das consequências nas três dimensões são considerados contínuos para fins de estimação da função utilidade (GARCEZ. T. V., 2009).

Para tanto, é realizada a elicitación da função utilidade unidimensional (DE ALMEIDA, 2013) através de loterias, onde as consequências dos critérios representados por

C_1 , C_2 e C_3 , irá estabelecer uma ordem de preferência do decisor entre essas consequências, dessa forma têm-se:

$$C_n P C_{n-1} P \dots P C_1 P C_2 P C_3$$

Para a eliciação da função utilidade do critério impacto humano ($U(c_1)$), foram analisadas diversas loterias nos intervalos [0; 2 fatalidades], como segue:

A primeira loteria realizada representa a comparação existente entre a melhor (0 mortes) e a pior consequência (2 mortes) para o critério C_1 sob a visão do decisor com uma probabilidade de 50% de chance. Desta forma, elicita-se do DM um equivalente certo de número de fatalidades na qual o DM ficaria indiferente à loteria apresentada anteriormente. Neste caso, tem-se que:



Agora é realizada uma nova comparação de loteria entre a melhor (0 mortes) e a consequência intermediária (1,3 mortes) para o critério C_1 sob a visão do decisor com uma probabilidade de 50% de chance. Desta forma, elicita-se do DM um equivalente certo de número de fatalidades na qual o DM ficaria indiferente à loteria apresentada anteriormente. Neste caso, tem-se que:



Novamente é realizada uma nova comparação de loteria entre a consequência intermediária (1,3 mortes) e a pior (2 mortes) para o critério C_1 sob a visão do decisor com uma probabilidade de 50% de chance. Desta forma, elicita-se do DM um equivalente certo de número de fatalidades na qual o DM ficaria indiferente à loteria apresentada anteriormente. Neste caso, tem-se que:



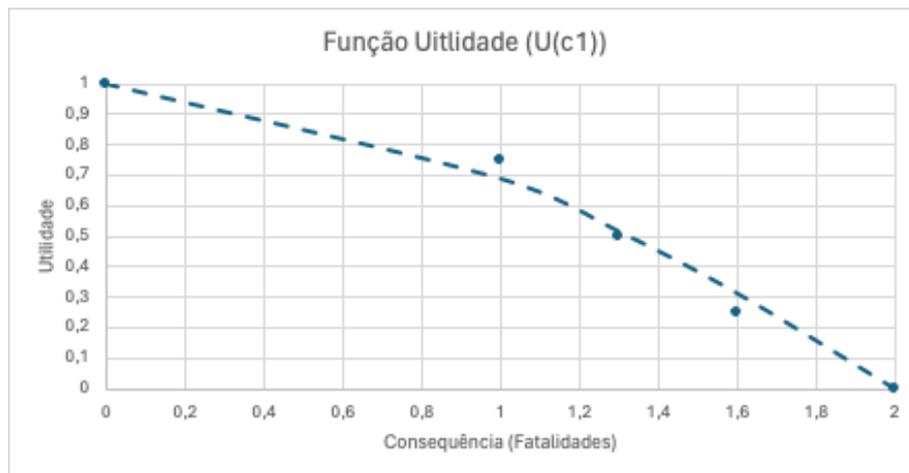
Resultando assim nos pontos da função de utilidade $U(c_1)$, mostrados na Tabela 3, que posteriormente, realizando uma regressão linear obtêm-se a equação $U(c_1) = 1 - \left(\frac{c_1}{\max(c_1)}\right)^{1,69}$, conforme mostrada na Figura 6.

Tabela 3 - Consequências do atributo C_1 para sua respectiva utilidade

x	$u(x)$
0	1
1	0,75
1,3	0,5
1,6	0,25
2	0

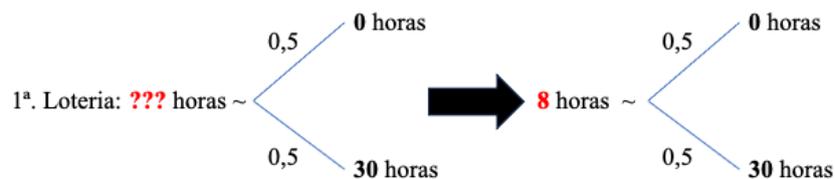
Fonte: O autor (2024)

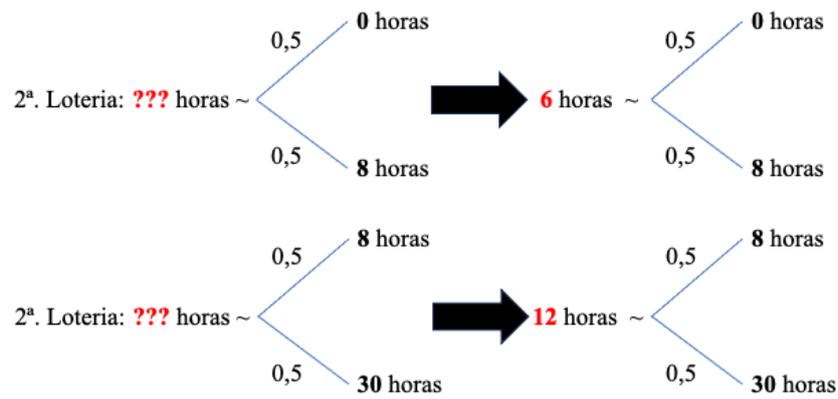
Figura 6 – Função utilidade do critério 1 ($U(c_1)$)



Fonte: O autor (2024)

De forma análoga foram realizadas também as análises de equivalentes certos e suas respectivas loterias para o critério C_2 . Para isso considera-se o intervalo de consequência [0; 30 horas].





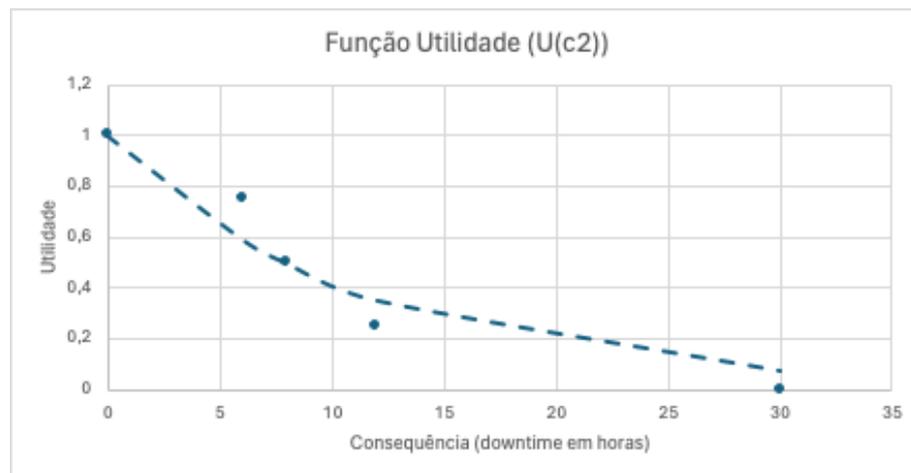
Resultando assim nos pontos da função de utilidade $U(c_2)$, mostrados na Tabela 4, que posteriormente, realizando uma regressão linear obtêm-se a equação $U(c_2) = e^{-0,088c_2}$, conforme mostrada na Figura 7.

Tabela 4 - Consequências do atributo C_2 para sua respectiva utilidade

x	u(x)
0	1
6	0,75
8	0,5
12	0,25
30	0

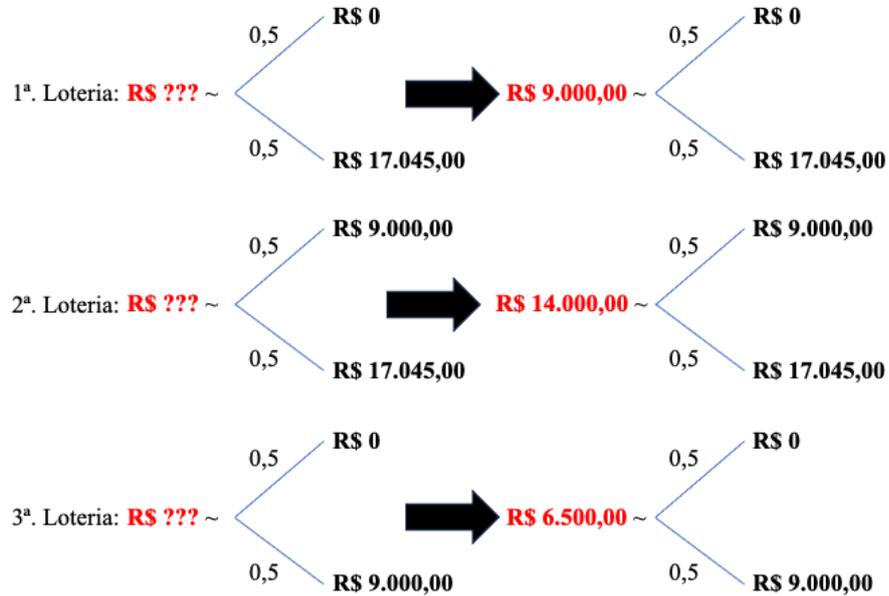
Fonte: O autor (2024)

Figura 7 – Função utilidade do critério 2 ($U(c_2)$)



Fonte: O autor (2024)

Por fim, de forma análoga foram realizadas também as análises de equivalentes certos e suas respectivas loterias para o critério C_3 . Para isso considera-se o intervalo de consequência $[0; R\$17045,00]$.



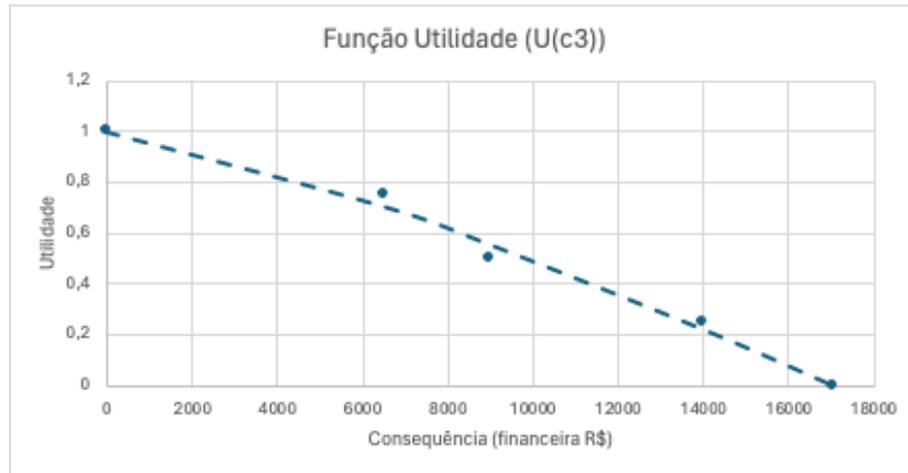
Resultando assim nos pontos da função de utilidade $U(c_3)$, mostrados na Tabela 5, que posteriormente, realizando uma regressão linear obtêm-se a equação $U(c_3) = 1 - \left(\frac{c_3}{\max(c_3)}\right)^{1,27}$, conforme mostrada na Figura 8.

Tabela 5 - Consequências do atributo C_3 para sua respectiva utilidade

x	u(x)
0	1
6500	0,75
9000	0,5
14000	0,25
17045	0

Fonte: O autor (2024)

Figura 8 – Função utilidade do critério 3 ($U(c_3)$)



Fonte: O autor (2024)

Em se tratando de funções utilidade, a concavidade da curva de utilidade permite interpretar sobre o comportamento do decisor frente ao risco. Dessa forma, para os critérios 1 (fatalidade) e 3 (financeiro) observa-se a aversão ao risco. Em contrapartida, observa-se um comportamento de propensão ao risco referente a dimensão de consequência 2 (downtime).

Para a avaliação inter-critério é preciso estimar as constantes de escala correspondentes a cada um dos critérios. A constante de escala está associada à taxa de substituição, que traduz a ideia de compensação de ganho em um critério, quando se perde em outro. Ela depende não apenas do grau de importância do critério, mas também dos valores de referência estabelecidos entre a pior e a melhor opção, ou seja, depende da faixa de valores considerados no espaço de consequências (DE ALMEIDA, 2013). Um dos papéis da constante de escala no modelo aditivo é efetuar a conversão das escalas de funções utilidade condicional $u(x)$ e $u(y)$ para a escala de avaliação global $u(x, y)$.

Keeney *et al.* (1979) descreveram o procedimento trade-off de elicitação da função utilidade multiatributo em cinco estágios:

- Introdução a terminologias e ideias;
- Identificação das suposições de independência;
- Avaliação das funções utilidades condicionais;
- Avaliação das constantes de escala; e
- Verificação da consistência e reiteração.

Supondo-se que o decisor é independente aditivamente, é definido por meio de um procedimento de elicitação baseados também em comparações de loterias, a ordenação dos critérios, que são descritas da seguinte maneira, levando em consideração que c^* seja a melhor

opção (consequência mais desejável) e c^0 a pior (consequência menos desejável) para os três critérios C_1 (fatalidade), C_2 (downtime) e C_3 (financeiro). Portanto, tem-se que:

$\langle c_1^*; c_2^0; c_3^0 \rangle$: O 1º conjunto de loterias leva como critério mais importante o C_1 .

$\langle c_1^0; c_2^0; c_3^* \rangle$: O 2º conjunto de loterias leva como critério mais importante o C_3 .

$\langle c_1^0; c_2^*; c_3^0 \rangle$: O 3º conjunto de loterias leva como critério mais importante o C_2 .

A partir da ordenação dos critérios, são realizadas novas comparações de loterias entre os critérios para então serem encontradas as três equações que levarão a definição das constantes de escala k_1, k_2 e k_3 , na qual $k_1 + k_2 + k_3 = 1$, uma vez que se considera a suposição de independência aditiva. A ideia básica para avaliar as três constantes de escalas é obter um conjunto com três equações independentes com três incógnitas, que são então resolvidas para obter as constantes de escala (k). Essas equações podem ser geradas a partir de considerações de certeza, de considerações probabilísticas ou de uma combinação de ambas (KEENEY; RAIFFA; RAJALA, 1979) Os valores das constantes de escala estimados foram $k_1 = 0,67$, $k_2 = 0,16$ e $k_3 = 0,17$.

4.2.10. IDENTIFICAÇÃO DAS MEDIDAS DE CONTROLE

Nesta etapa são identificadas as medidas de controle que estão implementadas ou que deverão ser implementadas para a contingência do risco (prevenção e/ou mitigação). Portanto, essas medidas para monitoramento de controle dos cenários de perigo podem ser ampliadas com a implantação de relés de proteção, como, por exemplo, para curto-circuito devido elevações de temperatura durante o uso do transformador, que podem ser reguláveis pelo seu responsável, sendo assim capaz de se ter um melhor monitoramento, controle e coleta de dados.

Outras maneiras de ocorrer o curto-circuito no transformador mais citadas na literatura são: (I) falha no isolamento interno, (II) contaminação do óleo isolante, (III) sobretensões transitórias, (IV) danos físicos ou mecânicos, (V) erro de operação e manutenção. É importante enfatizar que cada caso de curto-circuito em um transformador pode ter uma causa distinta, podendo se modificar a depender de cada condição de operação e do fator do ambiente. A prevenção de curtos-circuitos demanda medidas de segurança adequadas, bem como, sistemas de proteção, monitoramento contínuo e manutenção preventiva constante.

Ademais, estas medidas podem estar associadas, por exemplo, à engenharia de segurança do projeto, aos processos de controle de gestão, à disponibilização de etiquetas de advertência ou a atividades de manutenção para prevenir a ocorrência de falhas, bem como a

ações de capacitação/formação. Exemplos existentes são sistemas de desligamento, sistemas de alívio/exaustão, sistemas de proteção contra incêndio, detectores de fumaça e procedimentos de evacuação.

Para eliminar ou mitigar os riscos associados aos transformadores de potência a óleo, podem ser implementadas várias medidas de controle e boas práticas de manutenção preventiva, contudo, serão apresentadas medidas de controle apropriadas para cada um dos desvios encontrados no estudo.

Para controlar o aumento de vibração (d_1) em um transformador existem várias medidas que podem ser adotadas, dependendo da causa específica da vibração, bem como o isolamento de vibração (ZOU *et al.*, 2018) que utilize dispositivos como amortecedores de borracha ou molas de isolamento, para minimizar a transferência de vibração do transformador para a estrutura circundante.

Outra medida de controle seria a verificação de aterramento (THERON; ROH; CLARK, 2021), onde se deve certificar-se de que o transformador e suas estruturas estejam devidamente aterrados para dissipar correntes indesejadas que podem contribuir para a vibração.

Para garantir a ausência de vibração (d_2) ou redução significativa dela em um transformador, uma das principais medidas de controle é a implementação de bases de isolamento vibracional (XU *et al.*, 2018). A utilização de bases ajuda a minimizar a transmissão de vibrações do transformador para a estrutura e o solo, proporcionando um ambiente mais estável e reduzindo a amplitude das vibrações, essas podem ser feitas de materiais como borracha, molas ou outros materiais elastoméricos que absorvem e dissipam as vibrações.

Além disso, outra medida importante inclui um balanceamento preciso para garantir que o transformador seja montado e instalado de forma precisa e equilibrada, levando em consideração a distribuição de massa e carga para evitar desequilíbrios que possam causar vibrações indesejadas (NASIR; COOB, 2016).

Para as medidas que visam controlar e diminuir a vibração (d_3) em um transformador resultando em um funcionamento mais estável e eficiente do equipamento de acordo com suas necessidades e condições operacionais, pode-se citar o amortecimento de vibração (ZHU; HAO; LU, 2022), que implemente dispositivos de amortecimento, como amortecedores de massa sintonizados ou amortecedores de borracha, para reduzir a amplitude das vibrações e minimizar a ressonância do transformador. Esses dispositivos ajudam a dissipar a energia vibracional e reduzir a transmissão das vibrações para a estrutura e para o ambiente circundante.

Outra medida de controle, seria o balanceamento de massa (ZHANG *et al.*, 2011), que por sua vez realiza um balanceamento preciso da massa do transformador, garantindo que os componentes internos e a carga estejam distribuídos de maneira uniforme. O desequilíbrio de massa pode levar a vibrações excessivas, portanto, equilibrar adequadamente o transformador ajuda a reduzir essas vibrações indesejadas.

Para controlar e gerenciar o aumento de fluxo (d_4) no transformador de potência, uma das principais medidas é a implementação de um sistema de controle de tensão (CHEN *et al.*, 2016). Manter a tensão dentro dos limites operacionais seguros é crucial para evitar o aumento excessivo de fluxo magnético no transformador. Tal controle pode se dar por um Regulador Automático de Tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) ou um Sistema de Controle de Excitação (PANFILOV; ZHURAVLEV; ASTASHEV, 2019), para monitorar e ajustar a tensão na entrada e saída do transformador. O AVR regula a tensão fornecida ao transformador, mantendo-a dentro dos limites operacionais seguros, o que, por sua vez, controla o fluxo magnético no núcleo do transformador. Esse sistema de controle monitora a tensão em tempo real e faz ajustes automáticos na excitação ou na tapagem do transformador para garantir que a tensão se mantenha dentro dos limites adequados, evitando o aumento excessivo de fluxo e garantindo a operação segura do transformador.

A ausência de fluxo magnético (d_5) em um transformador não é possível durante o funcionamento normal, pois o fluxo magnético é fundamental para a transferência de energia entre os enrolamentos primário e secundário do transformador (DAS; DIVAN; HARLEY, 2010). O fluxo magnético é criado quando há uma diferença de potencial (tensão) aplicada ao enrolamento primário do transformador, induzindo uma corrente no enrolamento e, conseqüentemente, um fluxo magnético no núcleo.

No entanto, é importante manter o fluxo magnético dentro de limites seguros e operacionais para garantir o desempenho adequado e a vida útil do transformador. Uma medida de controle para garantir que o fluxo magnético não exceda limites seguros é o monitoramento e controle de tapagem (Regulação da Relação de Transformação), que implemente um sistema de monitoramento contínuo e controle de tapagem no transformador. A tapagem é a relação de transformação entre o número de espiras do enrolamento primário e do enrolamento secundário. Ajustando a tapagem corretamente, é possível controlar a tensão no lado secundário do transformador e, por consequência, o fluxo magnético no núcleo. Garante que a tapagem seja ajustada de acordo com a carga e as condições operacionais para manter o fluxo magnético dentro de limites seguros (DAS; DIVAN; HARLEY, 2010).

Portanto, monitorar e controlar a tapagem é essencial para evitar sobrecargas e garantir que o transformador funcione de maneira eficiente, evitando a saturação do núcleo e mantendo o fluxo magnético em níveis seguros. Vale ressaltar que manter o transformador em operação sem fluxo magnético não é viável ou necessário para o seu funcionamento normal, pois o fluxo magnético é a base do princípio de operação de um transformador, e o controle adequado do fluxo magnético dentro de limites seguros é a prática recomendada (DAS; DIVAN; HARLEY, 2010).

Para controlar e diminuir o fluxo magnético (d_6) em um transformador é fundamental manter o fluxo dentro dos limites seguros para evitar a saturação do núcleo e garantir o funcionamento eficiente dele. Pode-se citar como uma das medidas, o controle da tensão de alimentação (tensão de excitação) (TU *et al.*, 2018), que ajusta a tensão de alimentação do transformador, também conhecida como tensão de excitação ou tensão aplicada no enrolamento primário, para controlar o fluxo magnético no núcleo. Reduzir a tensão de excitação diminuirá o fluxo magnético, garantindo que o transformador opere dentro dos limites de saturação do núcleo, isso pode ser feito manualmente ou automaticamente dependendo da configuração e do sistema de controle do transformador.

Essa medida é fundamental para manter o transformador funcionando de maneira eficiente e segura, pois um fluxo magnético excessivo pode levar a problemas como sobreaquecimento, perdas excessivas e danos ao núcleo.

O aumento do teor de umidade (d_7) do transformador não é desejada, pois pode comprometer o isolamento elétrico e reduzir a eficiência operacional. No entanto, caso seja necessário aumentar o teor de umidade controladamente para manter a umidade dentro de limites aceitáveis, algumas medidas podem ser tomadas, como um sistema de controle de umidade, que implemente um sistema de controle no ambiente onde o transformador está localizado, esse sistema pode incluir a utilização de desumidificadores e humidificadores controlados, permitindo ajustar a umidade conforme necessário. Os humidificadores podem ser utilizados para liberar vapor de água no ambiente, aumentando o teor de umidade de forma controlada (CORREIA *et al.*, 2020).

Cuidados durante a manutenção do transformador também são necessários, como a abertura da tampa do tanque, onde é possível introduzir umidade de forma controlada. O ambiente interno pode ser umedecido ou vapor de água pode ser injetado de maneira controlada para aumentar a umidade no interior do transformador.

Manter um transformador com ausência do teor de umidade (d_g) é fundamental para garantir seu desempenho, durabilidade e segurança. Medidas de controle como a desidratação e secagem do transformador para realizar de maneira controlada e adequada (ATTIYAH; ALNUJAIMI; ALGHAMDI, 2019), que utilize equipamentos e métodos especializados, como unidades de desumidificação a vácuo, que removem a umidade do óleo isolante e do papelão isolante, sem danificar o transformador é necessário. Esse processo reduz ou elimina a umidade presente no transformador, garantindo um ambiente seco e propício para o funcionamento adequado.

Outra medida seria a vedação e isolamento adequados, certificando-se que o transformador esteja devidamente vedado e isolado para evitar a entrada de umidade externa (LI *et al.*, 2021). A vedação eficaz de juntas, tanques e outras aberturas é crucial para manter o interior do transformador protegido contra a umidade ambiental, além disso, garantir que o isolamento elétrico seja intacto e funcional, pois isso contribui para evitar a absorção de umidade no interior do transformador. Essas medidas de controle são essenciais para garantir que o transformador de potência permaneça livre de umidade, assegurando seu funcionamento eficiente e prolongando sua vida útil.

Para diminuir o teor de umidade (d_g) em um transformador de potência e garantir o adequado desempenho e a longevidade do equipamento, é fundamental controlar a umidade de maneira eficaz. Como medida de controle a priori pode-se citar segundo o estudo de (GHIASIRAD *et al.*, 2021) o processo de desumidificação e secagem, que implemente um processo de desumidificação e secagem no transformador. Isso pode ser feito utilizando equipamentos especializados, como unidades de desumidificação a vácuo, que removem a umidade do óleo isolante e do papel isolante. A desumidificação por meio do vácuo reduzirá a umidade do óleo e do papelão isolante, garantindo um ambiente seco dentro do transformador.

É importante que também se realize análises e manutenções periódicas para avaliar a presença de umidade no transformador (ADIL HABEEB *et al.*, 2020). Para isso, pode-se utilizar de técnicas de análise do óleo isolante, como cromatografia de gases, para monitorar o teor de umidade no óleo. Caso seja detectada uma quantidade excessiva de umidade, é possível realizar processos de desumidificação adicionais ou outras ações corretivas necessárias para reduzir a umidade. Essas medidas visam garantir que o transformador de potência mantenha níveis adequados de umidade, o que é crucial para a segurança e eficiência operacional do equipamento.

As medidas de controle que ajudarão no aumento a estanqueidade (d_{10}) do transformador, protegendo-o contra a entrada de contaminantes e garantindo um ambiente interno seco e adequado para o funcionamento eficiente do equipamento são, além da manutenção regular e a inspeção contínua que são fundamentais para assegurar que a estanqueidade seja mantida ao longo do tempo, a melhoria nas juntas e vedações, incluindo aquelas nas portas de inspeção, tanque e outras aberturas. Utilizando-se de materiais de vedação de alta qualidade e durabilidade que garantam uma vedação hermética eficaz (TAKAMI; MAHMOUDI, 2008).

Outra medida é a realização de uma revisão e reforço abrangente da estrutura do transformador para garantir que não haja pontos de entrada ou pontos fracos que possam comprometer a estanqueidade (DAS; GUPTA, 2020). Reforço as áreas críticas para evitar vazamentos e garantir uma vedação eficaz, pois isso pode envolver o uso de técnicas de soldagem, revestimentos de proteção e outros métodos de reforço estrutural.

A ausência de estanqueidade (d_{11}) não é desejada e pode resultar em danos ao transformador, no entanto, se a questão for a falta de estanqueidade devido a algum problema que precise ser corrigido, medidas de controle devem ser tomadas para garantir a estanqueidade adequada, como inspeções regulares e manutenção preventiva para identificar e corrigir quaisquer problemas de estanqueidade (MILOSAVLJEVIC; JANJIC, 2020). Durante a inspeção, recomenda-se a verificação das juntas, vedações e outras áreas críticas onde a estanqueidade pode estar comprometida. Substituir ou reparar as vedações danificadas, retornar à condição de estanqueidade e garantir que o transformador esteja hermeticamente fechado.

Outra medida de controle é o reparo e vedação adequada caso a estanqueidade tenha sido comprometida devido a danos ou desgaste, para executar os reparos necessários, isso pode incluir substituição de vedações deterioradas, aplicação de material de vedação adequado ou até mesmo a reestruturação das áreas com vazamentos, e assegurar-se de que todas as aberturas estejam seladas corretamente para manter a estanqueidade do transformador (DE AVILA; MUNARO; MUNARO, 2022). É fundamental corrigir a ausência de estanqueidade de maneira adequada para garantir o funcionamento seguro e eficaz do transformador, manter a sua integridade nas vedações e a hermeticidade é vital para proteger o equipamento e prolongar sua vida útil.

A diminuição da estanqueidade (d_{12}) também não é desejada, pois pode levar a danos e comprometer o desempenho do transformador, no entanto, caso haja a necessidade temporária de reduzir a estanqueidade para permitir ventilação ou outro propósito específico é importante

tomar algumas medidas de controle, como o controle de válvulas ou aberturas de ventilação (CORREIA *et al.*, 2020), se o objetivo for permitir ventilação controlada para reduzir a estanqueidade temporariamente, pode-se abrir válvulas ou aberturas de ventilação projetadas no transformador. No entanto, isso deve ser feito de forma controlada e monitorada, garantindo que a quantidade de ar ou umidade permitida seja segura e dentro dos limites operacionais aceitáveis.

Segundo Zitong *et al.* (2021), é importante que se realize monitoramento contínuo e ajuste controlado da estanqueidade durante o período em que a redução temporária for necessária, que se utilize de sistemas de monitoramento para verificar a pressão interna do transformador e, se possível, ajuste as válvulas ou aberturas de ventilação de forma controlada para manter a estanqueidade dentro dos limites aceitáveis e permitir a ventilação necessária. Ressaltando que a estanqueidade é vital para a proteção e desempenho do transformador, e qualquer ação para reduzi-la temporariamente deve ser cuidadosamente planejada e controlada, garantindo que não comprometa a integridade do equipamento.

O aumento da frequência de sobrecargas (d_{13}) em um transformador não é uma prática recomendada, pois sobrecargas frequentes podem levar a danos permanentes e comprometer sua vida útil e desempenho. No entanto, se for preciso controlar e monitorar a frequência de sobrecargas para avaliação e análise específica, algumas medidas podem ser aplicadas para esse fim, bem como, um sistema de monitoramento e registro de sobrecargas (MAHAJAN; ROBALINO; SIVAN, 2010) que ao ser implementado registre e analise as sobrecargas no transformador. Utilizando sensores e dispositivos de monitoramento para medir correntes, tensões e outras variáveis elétricas relevantes, esse sistema deve registrar as ocorrências de sobrecargas, a frequência, a duração e a magnitude delas, e a partir dessas informações, é possível analisar os padrões de sobrecarga e tomar decisões informadas sobre medidas corretivas ou melhorias no sistema.

De acordo com Zhalefar e Pasand (2006), melhorias operacionais também são necessárias, para controle é importante que se realize uma análise detalhada dos dados coletados sobre as sobrecargas e identifique as causas raízes, e com base nessa análise, implemente melhorias operacionais no sistema elétrico, como ajustes na carga, redistribuição de carga entre transformadores, melhorias no sistema de proteção ou até mesmo a instalação de transformadores adicionais para aliviar a carga. O objetivo é reduzir a frequência das sobrecargas, garantindo um funcionamento seguro e eficiente do transformador. É essencial priorizar a operação do transformador dentro de suas capacidades nominais para garantir a

integridade e a vida útil do equipamento, pois sobrecargas frequentes podem levar a danos no isolamento, aumento da temperatura e redução da eficiência, resultando em custos de manutenção mais altos e possíveis falhas do transformador.

A ausência da frequência de sobrecargas (d_{14}) em transformadores é fundamental para garantir sua operação segura e prolongar sua vida útil, uma das medidas de controle que pode ser citada é a análise e dimensionamento adequado do transformador (MARTIN *et al.*, 2017), onde se deve realizar uma análise detalhada das características da carga e do sistema elétrico para garantir que o transformador esteja corretamente dimensionado para suportar as demandas de carga, levar em consideração a carga máxima esperada, os picos de demanda e as variações sazonais e certificar-se de que o transformador tenha uma capacidade adequada para lidar com essas variações sem entrar em sobrecarga.

Outra medida seria a implementação de proteções e dispositivos de controle adequados (ZHANG *et al.*, 2011) onde seja feita a instalação de dispositivos de proteção, como relés de sobrecorrente e dispositivos de proteção térmica, que possam detectar sobrecargas e desligar o transformador temporariamente para evitar danos, e assim poder configurar esses dispositivos de forma adequada para atuar prontamente em caso de sobrecargas, interrompendo a corrente de entrada antes que danos ocorram.

Para diminuir a frequência de sobrecargas (d_{15}) em um transformador e garantir sua operação segura e eficiente, é importante implementar medidas de controle adequadas, bem como, a adequação do dimensionamento e redefinição de cargas (ROSLAN *et al.*, 2017), onde realiza-se uma análise detalhada da carga conectada ao transformador e avalia-se se ele está dimensionado corretamente para atender à demanda. Se o transformador estiver operando frequentemente próximo ou acima de sua capacidade nominal, considera-se a possibilidade de redistribuir a carga entre transformadores, adicionar transformadores adicionais ou até mesmo redesenhar a distribuição de carga para evitar sobrecargas, e por fim certificar-se de que o dimensionamento do transformador atenda à demanda de carga atual e futura.

Outra medida seria a implementação de sistemas de gerenciamento de carga e monitoramento avançado, utilizando-se de sistemas avançados de gerenciamento de carga que monitorem continuamente a demanda de carga e o desempenho do transformador (ZIOMEK; VIJAYAN; SANDERS, 2014). Esses sistemas podem prever padrões de carga e fornecer alertas proativos para possíveis sobrecargas iminentes, além de permitir uma gestão mais eficaz da carga, distribuindo-a de forma equitativa e evitando picos de demanda que levam a sobrecargas. Ao aplicar essas medidas de controle, é essencial manter um programa de manutenção

preventiva eficaz, monitorar regularmente a saúde do transformador e investir em tecnologia de automação para garantir uma operação eficiente e segura do sistema elétrico.

A Tabela 6 apresenta as etapas de 6-10 do estudo MHAZOP.

Tabela 6 - Etapas de 6 a 10 do estudo MHAZOP

ETAPA 6			ETAPA 7	ETAPA 8	ETAPA 10
PALAVRA GUIA (<i>g</i>)	PARÂMETROS (<i>j</i>)	DESVIOS (<i>d</i>)	CENÁRIOS DE PERIGO (θ)	ANÁLISE DE EXPOSIÇÃO	MEDIDAS DE CONTROLE
Mais	Vibração	Aumento de vibração (d_1)	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2) e Incêndios (θ_3)	Sobrecarga de corrente, curto-circuito repentino e severo	Isolamento de vibração, Verificação de aterramento
Nenhum	Vibração	Ausência de vibração (d_2)	Vazamento de óleo (θ_1) e Incêndios (θ_3)	Falha de energização, Superaquecimento	Implementação de bases de isolamento vibracional, balanceamento preciso
Menos	Vibração	Diminuição de vibração (d_3)	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2) e Incêndios (θ_3)	Desligamento súbito, Falha do sistema de resfriamento	Amortecimento de vibração, Balanceamento de massa
Mais	Fluxo	Aumento de fluxo (d_4)	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2)	Sobrecargas, Perda de eficiência	Implementação de um sistema de tensão ou excitação
Nenhum	Fluxo	Ausência de fluxo (d_5)	Vazamento de óleo (θ_1)	Perda de energia, Desligamento ou falha	Não é possível ocorrer durante o funcionamento
Menos	Fluxo	Diminuição de fluxo (d_6)	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2) e Incêndios (θ_3)	Sobrecarga nos enrolamentos, Ressonância de vibração	Controle da tensão de alimentação
Mais	Teor de umidade	Aumento do teor de umidade (d_7)	Explosões (θ_2) e Incêndios (θ_3)	Comprometimento do isolamento elétrico, corrosão e deterioração dos enrolamentos	Sistema de controle de umidade, Cuidados durante a manutenção
Nenhum	Teor de umidade	Ausência do teor de umidade (d_8)	Vazamento de óleo (θ_1) e Incêndios (θ_3)	Redução da capacidade de resfriamento, Desgaste prematuro dos materiais	Desidratação e secagem do transformador, Vedação e isolamento adequados
Menos	Teor de umidade	Diminuição do teor de umidade (d_9)	Vazamento de óleo (θ_1) e Incêndios (θ_3)	Rigidez dielétrica reduzida, Desgaste acelerado dos materiais	Processo de desumidificação e secagem, Análises e manutenções periódicas do óleo isolante

Mais	Estanqueidade	Aumento da estanqueidade (d_{10})	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2)	Diminuição da ventilação e da capacidade de liberar gases internos, Acúmulo de gases	Melhoria nas juntas e vedações, Revisão e reforço abrangente do transformador
Nenhum	Estanqueidade	Ausência da estanqueidade (d_{11})	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2)	Diminuição da ventilação e da capacidade de liberar gases internos, Acúmulo de gases	Inspeções regulares e manutenção preventiva, Reparo e vedação adequada
Menos	Estanqueidade	Diminuição da estanqueidade (d_{12})	Vazamento de óleo (θ_1)	Vazamento do óleo isolante	Controle de válvulas ou aberturas de ventilação, Monitoramento contínuo e ajuste controlado
Mais	Frequência de sobrecargas	Aumento da frequência de sobrecargas (d_{13})	Explosões (θ_2)	Sobrecargas de curta duração frequentes, Operação em sobrecarga constante, Sobrecargas devido a eventos climáticos	Sistema de monitoramento e registro de sobrecargas, Melhorias operacionais como análise detalhada dos dados coletados
Nenhum	Frequência de sobrecargas	Ausência da frequência de sobrecargas (d_{14})	Explosões (θ_2)	Envelhecimento prematuro do equipamento, Perda de eficiência energética, Instabilidade do sistema elétrico	Análise e dimensionamento adequado do transformador, Implementação de proteções e dispositivos de controle adequados
Menos	Frequência de sobrecargas	Diminuição da frequência de sobrecargas (d_{15})	Vazamento de óleo (θ_1), Explosões (θ_2)	Acúmulo de umidade e gases no isolamento, Redução na capacidade de carga, Sobrecargas repentinas	Adequação do dimensionamento e redefinição de cargas, Implementação de sistemas de gerenciamento de carga e monitoramento avançado

Fonte: O autor (2024)

4.2.11. ESTIMAÇÃO DAS FUNÇÕES DE PROBABILIDADE DAS CONSEQUÊNCIAS

Nesta etapa deve-se estimar as funções de probabilidade das consequências $P(p_{c_r} | \theta_q, d(i, j \times j, g \times g))$ advindas da ocorrência de um desvio $d(i, j \times j, g \times g)$ e um cenário de perigo (θ_q). Essas funções de consequência serão responsáveis por representar as incertezas pertinentes sobre as consequências derivadas de um estipulado cenário de perigo e caso ocorra o desvio, ele será representado.

O critério pode ser considerado de duas formas, quanto à sua variabilidade e incerteza, que pode ser determinístico ou probabilístico. Acredita-se que um critério determinístico tenha um nível constante de desempenho ou resultado fixo. Um critério probabilístico tem uma consequência x , que é uma variável aleatória e é especificada em termos de sua função de densidade de probabilidade (pdf): $f(x)$. Se um critério for uma variável aleatória, com uma variabilidade não relevante, pode ser considerado determinístico. Neste caso, atribui-se que o desvio padrão é tão pequeno, que a média da variável pode representar a consequência x de acordo com (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Segundo Garcez e Alencar (2022) em relação à incerteza, um DM pode considerar um critério ou um atributo como sendo ambíguo na representação da sua função de valor e, portanto, números *fuzzy* poderiam ser usados para representá-los. Neste caso, uma abordagem *fuzzy* pode ser considerada para o modelo de decisão, o que pode influenciar na escolha do método MCDM/A.

A distribuição de probabilidade de uma consequência específica é conhecida como função consequência P , que é representada pela probabilidade de alcançar uma dada consequência p (*payoff*), dado que ocorreu um cenário de perigo θ em determinado desvio d do transformador de potência.

A função de probabilidade das consequências na dimensão humana é representada pela matriz $P \begin{bmatrix} p_h & | \theta_q, & d_1 \\ & & \vdots \\ & & d_{15} \end{bmatrix}$. De forma análoga, obtêm-se as outras duas funções probabilísticas,

a função consequência para a dimensão *downtime* é representada pela matriz

$P \begin{bmatrix} p_d & | \theta_q, & d_1 \\ & & \vdots \\ & & d_{15} \end{bmatrix}$, e a função consequência para a dimensão financeira é representada pela

matriz $P \begin{bmatrix} p_f & | \theta_q, & d_1 \\ & & \vdots \\ & & d_{15} \end{bmatrix}$.

De forma simplificadora, considera-se, neste estudo, que as funções de probabilidades são representadas de forma determinísticas. Os respectivos valores de consequência estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Função probabilidade das consequências para cada um dos desvios

ETAPA 11									
<i>d</i>	<i>c</i> ₁			<i>c</i> ₂			<i>c</i> ₃		
	$P(c_1 d, \theta_1)$	$P(c_1 d, \theta_2)$	$P(c_1 d, \theta_3)$	$P(c_2 d, \theta_1)$	$P(c_2 d, \theta_2)$	$P(c_2 d, \theta_3)$	$P(c_3 d, \theta_1)$	$P(c_3 d, \theta_2)$	$P(c_3 d, \theta_3)$
<i>d</i> ₁	1	1,3	1,6	0	30	30	0	14000	9000
<i>d</i> ₂	0	-	1,3	0	-	8	0	-	7000
<i>d</i> ₃	0	1,6	1,3	0	12	8	0	14000	9000
<i>d</i> ₄	0	2	-	12	8	-	0	14000	-
<i>d</i> ₅	2	-	-	30	-	-	0	-	-
<i>d</i> ₆	2	1	1	30	30	12	17045	14000	9000
<i>d</i> ₇	-	1,6	1,3	-	12	8	-	9000	7000
<i>d</i> ₈	1,6	-	1,3	12	-	8	14000	-	9000
<i>d</i> ₉	2	-	2	8	-	8	7000	-	14000
<i>d</i> ₁₀	1,6	1,6	-	0	6	-	14000	14000	-
<i>d</i> ₁₁	1,6	1,6	-	0	6	-	14000	14000	-
<i>d</i> ₁₂	0	-	-	0	-	-	0	-	-
<i>d</i> ₁₃	-	1,3	-	-	6	-	-	7000	-
<i>d</i> ₁₄	-	1	-	-	0	-	-	7000	-
<i>d</i> ₁₅	0	0	-	8	8	-	0	7000	-

Fonte: O autor (2024)

4.2.12. ESTIMAÇÃO DAS PROBABILIDADES DOS CENÁRIOS DE PERIGO $\pi_d(\Theta)$

Nesta etapa estima-se as probabilidades de ocorrência dos cenários de perigo, que serão representadas pela função de probabilidade $\pi_d(\theta_q)$. A probabilidade pode ser observada através de levantamento de informações (dados de ocorrência do passado, dados de laboratórios, simulação, etc.). Caso não haja disponibilidade destas informações, poder-se-á utilizar o conhecimento subjetivo de especialistas através da elicitación da probabilidade subjetiva.

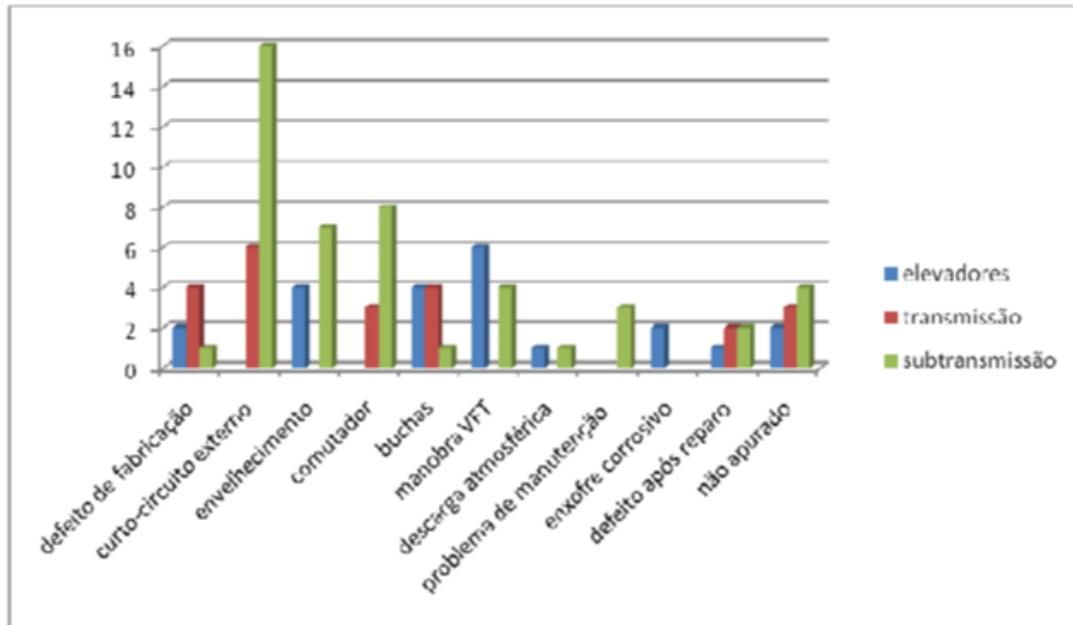
A análise de risco permite antecipar as falhas do sistema, ajudando assim a identificar potenciais causas e possíveis consequências. Essa antecipação pode ser alcançada através da análise de acidentes ocorridos anteriormente em instalações, tanto em instalações próprias como em empresas similares; registros na literatura especializada ou mantidos em bases de dados internacionais; testes laboratoriais; e testes de resistência física/química, para fins de simulação. Este tipo de análise permite uma avaliação estatística (frequentista) das causas e condições locais que favorecem a ocorrência de desvios. Uma alternativa para obter essas probabilidades é aproveitar o conhecimento *a priori* de um especialista.

O analista pode aplicar em um especialista o procedimento de elicitación intervalos equiprováveis para obter o $\pi(\theta)$ (DE ALMEIDA *et al.*, 2015). Devido ao problema de os dados de acidentes geralmente conterem dados limitados ou incompletos, essas duas formas de estimar probabilidades podem ser combinadas na tentativa de tirar vantagens de cada visão, para isso são utilizadas formas complementares, como a abordagem frequentista (histórica) e a abordagem Bayesiana (GARCEZ; ALENCAR, 2022).

Em um estudo realizado por Bechara (2010), os fatores que envolvem diretamente na probabilidade das falhas nos transformadores de potência que acarretam cenários acidentais são verificados e divididos em três grupos principais de transformadores, sendo eles: elevadores, transmissão e distribuição.

A Figura 9 mostra um gráfico de barras que ilustra de forma mais detalhada os tipos e quantidades de falhas para cada grupo de transformadores.

Figura 9 - Tipos e quantidades de falhas identificadas nos três grupos de transformadores de potência

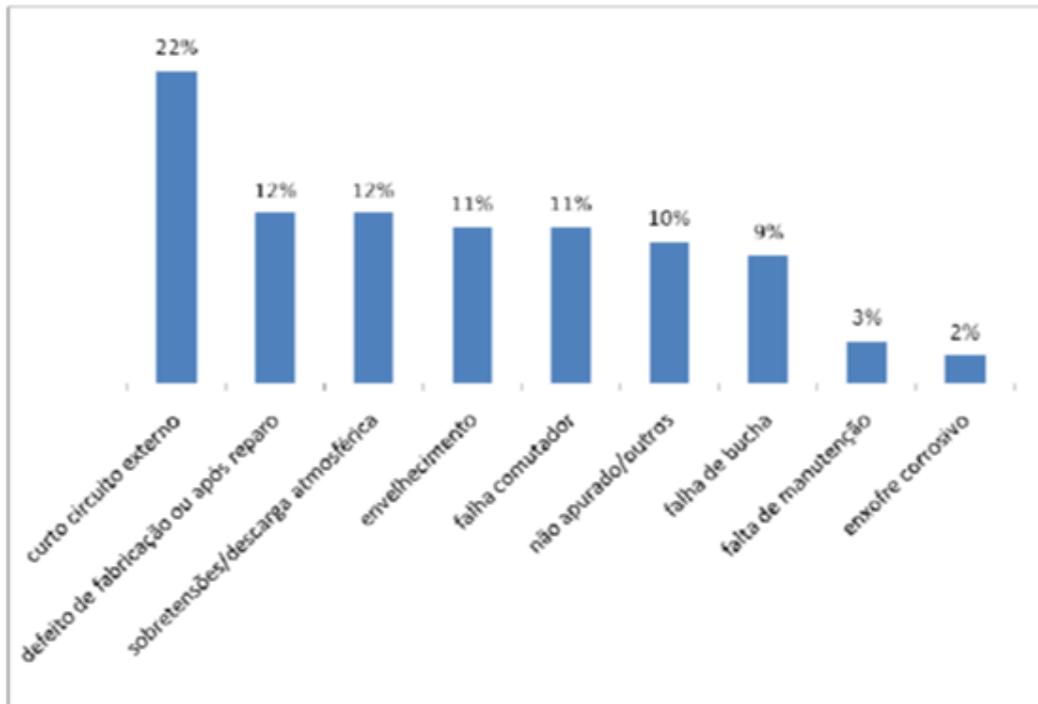


Fonte: Adaptado de (BECHARA, 2010)

No sentido de obter parâmetros e referências de falhas para transformadores como um todo, o gráfico acima mostrou os modos de falhas mais significativos em termos de quantidade para cada tipo de transformador.

Em função da amostra ter cerca de 50% de transformadores pertencentes ao sistema de distribuição, percebe-se nitidamente a porcentagem de falhas associáveis a curtos-circuitos externos com 22%, sendo a maior porcentagem obtida no estudo, que conforme mostrado anteriormente está diretamente ligado ao desvio (d_1), aumento de vibração. O gráfico ainda mostra danos de outras naturezas como se pode observar na Figura 10 através de suas devidas porcentagens.

Figura 10 - Porcentagem das falhas nos transformadores



Fonte: Adaptado de (BECHARA, 2010)

Para o presente estudo, os valores associados as probabilidades dos três cenários de perigo θ_q juntamente com o cenário de normalidade θ_N , baseado na literatura, estão apresentados na Tabela 8. Sendo que $\sum_q \pi(\theta_q) + \pi(\theta_N) = 1$.

Tabela 8 - Probabilidade dos cenários de perigo

ETAPA 12 - PROBABILIDADE DOS CENÁRIOS DE PERIGO				
d	$\pi_d(\theta_1)$	$\pi_d(\theta_2)$	$\pi_d(\theta_3)$	$\pi_d(\theta_n)$
d_1	1,00E-05	2,00E-05	3,00E-05	0,99994
d_2	1,00E-05	-	3,00E-05	0,99996
d_3	1,00E-05	2,00E-05	3,00E-05	0,99994
d_4	1,00E-05	2,00E-05	-	0,99997
d_5	1,00E-05	-	-	0,99999
d_6	1,00E-05	3,00E-05	2,00E-05	0,99994
d_7	-	2,00E-05	3,00E-05	0,99995
d_8	2,00E-05	-	3,00E-05	0,99995
d_9	3,00E-05	-	2,00E-05	0,99995
d_{10}	2,00E-05	3,00E-05	-	0,99995
d_{11}	1,00E-05	3,00E-05	-	0,99996
d_{12}	1,00E-05	-	-	0,99999
d_{13}	-	3,00E-05	-	0,99997
d_{14}	-	1,00E-05	-	0,99999
d_{15}	3,00E-05	2,00E-05	-	0,99995

Fonte: O autor (2024)

4.2.13. CÁLCULO DA FUNÇÃO PERDA

A função de perda é calculada pela negativo da função utilidade $L(\theta_q, d) = -u\left(P\left(p_{c_r} \mid \theta_q, d(i, j \times j, g \times g)\right)\right)$.

Após estimadas as Funções Utilidade (Etapa 9) e estimadas as Função probabilidade das consequências (Etapa 11), calcula-se os valores de utilidade para cada consequência e, conseqüentemente, a função perda $L(\theta_q, d)$ deles para cada um dos desvios, conforme mostrado na Tabela 9.

Tabela 9 - Representação da função perda $L(\theta_q, d)$ para cada um dos desvios

ETAPA 13 – FUNÇÃO PERDA										
d	$-u(P(c_1 d, \theta_1))$	$-u(P(c_1 d, \theta_2))$	$-u(P(c_1 d, \theta_3))$	$-u(P(c_2 d, \theta_1))$	$-u(P(c_2 d, \theta_2))$	$-u(P(c_2 d, \theta_3))$	$-u(P(c_3 d, \theta_1))$	$-u(P(c_3 d, \theta_2))$	$-u(P(c_3 d, \theta_3))$	
d_1	-0,75	-0,5	-0,25	-1	0	0	-1	-0,25	-0,5	
d_2	-1	-	-0,5	-1	-	-0,5	-1	-	-0,75	
d_3	-1	-0,25	-0,5	-1	-0,25	-0,5	-1	-0,25	-0,5	
d_4	-1	0	-	-0,25	-0,5	-	-1	-0,25	-	
d_5	0	-	-	0	-	-	-1	-	-	
d_6	0	-0,75	-0,75	0	0	-0,25	0	-0,25	-0,5	
d_7	-	-0,25	-0,5	-	-0,25	-0,5	-	-0,5	-0,75	
d_8	-0,25	-	-0,5	-0,25	-	-0,5	-0,25	-	-0,5	
d_9	0	-	0	-0,5	-	-0,5	-0,75	-	-0,25	
d_{10}	-0,25	-0,25	-	-1	-0,75	-	-0,25	-0,25	-	
d_{11}	-0,25	-0,25	-	-1	-0,75	-	-0,25	-0,25	-	
d_{12}	-1	-	-	-1	-	-	-1	-	-	
d_{13}	-	-0,5	-	-	-0,75	-	-	-0,75	-	
d_{14}	-	-0,75	-	-	-1	-	-	-0,75	-	
d_{15}	-1	-1	-	-0,5	-0,5	-	-1	-0,75	-	

Fonte: O autor (2024)

4.2.14. ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO RISCO $r_d(i, j \times j, g \times g)$

Nesta etapa calcula-se o valor de risco r_d , que está associado a ocorrência de um determinado desvio (d), que é dada pela equação:

$$r_d = \left(\sum_{\theta_q} \sum_{C_r} \pi_d(\theta_q) K_r L(\theta_q, d) \right) + \pi(\theta_N)(-1)$$

onde, K_r são constantes de escala, logo $\sum_{C_r} K_r = 1$.

Segundo Garcez e Alencar (2022), o valor de risco deve se embasar no valor de perda, levando em consideração que as perdas de acordo com os cenários de perigo (θ_q) e do desvio (d), nas dimensões de consequências (C_r) escolhidas na análise. Portanto, são somadas as perdas associadas a cada cenário de perigo e o desvio, nas inúmeras dimensões de consequências abordadas, multiplicadas pelas probabilidades dos cenários de perigo. A perda associada a um cenário de normalidade também é adicionada ao cálculo do risco.

Considerando que os valores de risco de cada dimensão correspondem ao negativo da utilidade da distribuição das consequências, e como as utilidades estão numa escala de 0 a 1, e as perdas numa escala de -1 a 0, então os riscos estarão em uma escala de -1 a 0. Desta forma, quanto mais próximo o valor do risco estiver de -1, mais seguro será o desvio $d(i, j \times j, g \times g)$ do transformador e, conseqüentemente, quanto mais próximo do valor 0, maior será o risco de o desvio ocorrer (GARCEZ; ALENCAR, 2022).

Os riscos associados aos seus respectivos desvios identificados (Etapa 14) neste estudo juntamente com o ordenamento dos riscos (Etapa 15) são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Função risco e ordenamento em hierarquia

DESVIO	ETAPA 14	ETAPA 15
<i>d</i>	Risco calculado	HIERARQUIA DE RISCOS
d_1	-0,9999835	9°.
d_2	-0,999991475	13°.
d_3	-0,9999877	11°.
d_4	-0,99998165	7°.
d_5	-0,99999	12°.
d_6	-0,99994625	1°.
d_7	-0,999958725	2°.
d_8	-0,999962625	4°.
d_9	-0,9999609	3°.
d_{10}	-0,99997785	6°.
d_{11}	-0,999985775	10°.
d_{12}	-0,9999967	15°.

d_{13}	-0,9999736	5°.
d_{14}	-0,9999916	14°.
d_{15}	-0,9999832	8°.

Fonte: O autor (2024)

4.2.15 ORDENAMENTO DOS DESVIOS EM HIERARQUIA DE RISCO

Nesta etapa são ranqueados os riscos de todas as alternativas (desvios (d)), do maior risco para o menor risco (decrecente), garantindo assim uma hierarquia de risco que ajudará na visualização e percepção do risco como o todo, indicando uma criticidade no nível de investimento para cada desvio (d) identificado para ações de prevenção e mitigação do risco. Esta hierarquia deve refletir as preferências do decisor quanto ao risco multidimensional dos desvios analisados.

Segundo Garcez e Alencar (2022), uma diferença encontrada nessa abordagem se dá quando comparada com outras tradicionais utilizadas para gerenciamento de riscos, desta forma é utilizada uma análise mais estruturada que, além de agregar os múltiplos critérios, leva em consideração as preferências do DM em relação ao risco. Assim, obtém-se um resultado mais robusto do que, por exemplo, seria o caso da utilização do RPN (*Risk Priority Number*) em um FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) ou mesmo escalas nominais subjetivas.

Estas são por vezes inseridas na planilha HAZOP para avaliar o nível de ocorrência e consequências de impacto dos desvios em análise, com isso a classificação obtida através da análise multidimensional proposta nesta seção pode ajudar os decisores a alocar os recursos, uma vez que estes são geralmente limitados e escassos. Portanto, seria melhor alocar recursos de forma a priorizar os desvios $d(i, j \times j, g \times g)$, adotando assim, medidas preventivas e mitigadoras no gerenciamento dos riscos de manutenção.

Com base na ordenação decrescente da hierarquia de risco, pôde-se observar os riscos mais críticos no top três como sendo em terceiro lugar d_9 “diminuição do teor de umidade”, em segundo lugar d_7 “aumento do teor de umidade” e em primeiro lugar como risco que se deve ter uma maior priorização d_6 “diminuição do fluxo”. Portanto, isso permite perceber que dois dos três riscos prioritários estão envolvidos com o teor de umidade, evidenciando que é necessário um monitoramento contínuo. Contudo, o risco de maior prioridade tem de fato haver com o fluxo, logo, a atenção e revisão contínua de manutenção deve estar sempre guiado a ele.

4.2.16. ANÁLISE DA HIERARQUIA DOS RISCOS E ANÁLISE SENSIBILIDADE

Nesta etapa deve-se realizar uma análise abrangente e crítica da hierarquia de risco. Além disso, para verificar a robustez dos resultados encontrados recomenda-se a realização da análise de sensibilidade, uma vez que se trata de avaliações que contêm incertezas e preferências do DM. Segundo (DE ALMEIDA *et al.*, 2015), a análise de sensibilidade pode indicar a necessidade de reavaliações de etapas anteriores devido a algumas hipóteses consideradas ou entrada de dados.

A análise de sensibilidade permite avaliar como as mudanças em determinados parâmetros de entrada afetam o resultado de um modelo, projeto ou decisão. Ela é extremamente importante para avaliar incertezas na condução de análises probabilísticas do risco. Existem várias técnicas para realizar essas análises, incluindo a análise determinística, que examina as mudanças em parâmetros específicos, e a análise probabilística, que lida com incertezas usando distribuições de probabilidade (CHRISTOPHER FREY; PATIL, 2002).

Uma análise mais detalhada da hierarquia final dos riscos obtida a partir do modelo proposto nessa etapa pode ser observada após a realização de uma análise de sensibilidade geral dos resultados. Este nível de detalhe do estudo no que diz respeito à hierarquia de riscos decorre da análise de robustez do processo, baseada na variação dos parâmetros (input) do modelo. Em resumo, desempenham um papel crucial na tomada de decisões informadas, na gestão de riscos e na otimização de recursos, seja em um contexto empresarial, de pesquisa ou em qualquer situação que envolva a consideração de múltiplas variáveis e seus impactos nos resultados desejados.

De acordo com esta análise pode-se indicar se os aspectos do modelo de estudo e dos dados de entrada são considerados robustos ou sensíveis, a fim de verificar se alguma etapa deve ser reavaliada (revisitada pelo DM) devido a algumas incertezas de hipóteses ou de dados de entrada. Além disso, no caso do problema de ordenação, o que se avalia é se alguma(s) alternativa(s) do ranking (desvios d) estabelecido sofreram variação em sua posição no ranking. Caso isso seja observado, pode-se fazer uma análise da frequência com que isso ocorre, em quais alternativas isso é observado, além da relevância da(s) mudança(s) de cargos. A análise de sensibilidade fornece ainda ao DM uma recomendação mais assertiva baseada na análise das variações que foram observadas ao longo da simulação, e informações sobre incertezas de diferentes grupos de parâmetros do modelo.

Para isso, foram realizadas três análises relacionadas as constantes de escala.

- Na primeira análise houve a inversão da constante de escala relacionada ao critério 1 (K_1) com a constante de escala do critério 2 (K_2). Sem mudanças na constante de escala relacionada ao critério 3 (K_3).
- Na segunda análise houve a inversão da constante de escala relacionada ao critério 1 (K_1) com a constante de escala do critério 3 (K_3). Sem mudanças na constante de escala relacionada ao critério 2 (K_2).
- Na terceira análise todas as constantes de escala estão com valores iguais.

A Tabela 11 apresenta os três cenários que foram realizados nas análises de sensibilidade em comparação com o cenário original

Tabela 11 - Análise de sensibilidade para os três critérios nos diferentes cenários

Cenários	C_1 - Fatalidades	C_2 - Downtime	C_3 - Financeiro
Original	$k_1 = 0,67$	$k_2 = 0,16$	$k_3 = 0,17$
1º Cenário	$k_1 = 0,16$	$k_2 = 0,67$	$k_3 = 0,17$
2º Cenário	$k_1 = 0,17$	$k_2 = 0,16$	$k_3 = 0,67$
3º Cenário	$k_1 = 0,333$	$k_2 = 0,333$	$k_3 = 0,333$

Fonte: O autor (2024)

A Tabela 12 apresenta os rankings gerados nos três novos cenários que foram realizados nas análises de sensibilidade em comparação com o cenário original.

Tabela 12- Rankings gerados através das análises de sensibilidade

Desvio	Ranking (Original)	Ranking (1º Cenário AS)	Ranking (2º Cenário AS)	Ranking (3º Cenário AS)
d_1	9	4↑	5↑	5↑
d_2	13	7↑	12↑	12↑
d_3	11	5↑	8↓	7↑
d_4	7	9↓	10↓	10↓
d_5	12	13↓	13↓	13↓
d_6	1	1~	2↓	1~
d_7	2	6↓	11↓	4↓
d_8	4	3↑	6↓	3↑
d_9	3	2↑	1↑	2↑
d_{10}	6	8↓	3↑	6~
d_{11}	10	10~	7↑	11↓
d_{12}	15	14↑	15~	14↑
d_{13}	5	12↓	9↓	9↓
d_{14}	14	15↓	14	14~
d_{15}	8	11↓	4↑	8~

Fonte: O autor (2024)

Como se pôde observar após a realização das análises de sensibilidade nota-se que nos cenários AS 1 e 3 em comparação com o original, o risco prioritário matem-se igual como sendo o desvio d_6 . Em contrapartida, já no segundo lugar do ranking, o risco d_7 não se mantêm-se igual em todos os cenários de análise de sensibilidade, obtendo ranking de riscos inferiores nos três cenários. Em compensação, considerando o terceiro maior risco d_9 nos três senários de AS, obteve-se ranking superiores, significando que este desvio pode ter um risco mais prioritário caso haja mudanças no parâmetro de entrada da estrutura de preferência do decisor.

O que nos leva a perceber que de uma visão geral o risco d_6 aparece com mais frequência em primeiro lugar do ranking de acordo com as análises de sensibilidade, reforçando assim a sua priorização como risco que mais tem probabilidade de ocorrer no contexto de transformadores de potência a óleo.

4.2.17 IMPLEMENTAÇÃO DAS AÇÕES DE GERENCIAMENTO DE RISCO

Uma vez analisada a hierarquia de risco e as análises de sensibilidade/robustez, são necessárias a avaliação de ações (preventivas e/ou mitigativas) de gestão de riscos. Para isso, o DM deve identificar as principais ações, priorizá-las e implementá-las aos desvios identificados no topo da hierarquia de risco. Isto é, deve-se priorizar ações de prevenção/mitigação de risco que contemple desvios com altos valores de risco.

Após a implementação e visto a eficácia das ações que foram realizadas para eliminar e/ou reduzir o risco multidimensional, deve-se realizar novos cálculos para os novos valores de risco e serem revisados e aprovados pelo decisor. Este processo deve ser cíclico para atender a todos os recursos disponíveis ou aos desvios ditos como críticos.

No estudo em questão, após finalmente o DM ter recebido a recomendação e aceitado a solução proposta, pode-se dar início a fase de implementação. Isso pode ocorrer de forma simples e imediato ou complexo e demorado, irá depender da proposta. A implementação das ações de gestão de riscos pode ser tão complexa quanto a condução do processo que levou à tomada de decisão e pode levar muito mais tempo para ser concluída do que o próprio processo de decisão.

A eficácia das ações de eliminação/mitigação dos riscos deve ser reavaliada através do recálculo dos valores de risco. E antes de fazê-lo, é necessário que decorra um período considerado necessário, somente após o qual o retorno da implementação da gestão de riscos

das ações poderá ser considerado satisfatório. Depois disso, os valores associados aos riscos analisados deverão ser recalculados, e se o valor associado a um determinado risco for reduzido, entende-se que as ações implementadas foram eficazes. Caso contrário, deverão ser buscadas alternativas de atuação no combate ao risco, a fim de obter um valor de risco inferior ao existente, com base nos cálculos do modelo (GARCEZ; ALENCAR, 2022).

Os resultados apresentados ao decisor após o estudo, que por sua vez teve uma boa resposta, já que atendem ao objetivo que foi traçado no início do trabalho, na qual gerou um ordenamento dos riscos para indicar quais devem ser priorizados, gerando também uma maior visibilidade para os riscos críticos.

Deve-se sempre ter em mente que as medidas de controle já eram existentes nos sistemas de acordo com a literatura, mas devem sempre serem reforçadas seus monitoramentos e manutenções dentro dos planos de gestão das áreas responsáveis pelo equipamento, para assim evitar falhas e cumprir os cronogramas adequados garantindo sempre o seu bom funcionamento, lembrando que é sempre importante o uso de algumas medidas adicionais que necessitaram ser implementadas e devem seguir a ordem hierarquia gerada.

E como ações mitigadoras para os três riscos mais críticos sugere-se:

- Para o desvio d_6 “diminuição de fluxo”, (1º. no ranking do risco) deve-se garantir um sistema eficiente de refrigeração para evitar o superaquecimento do transformador, o que pode afetar o fluxo magnético. Utilizar algum software de modelagem e simulação para avaliar o desempenho do transformador sob diferentes condições de carga e ajustar conforme necessário. E utilizar relés de proteção térmica e magnética para desconectar o transformador em casos de condições anormais.
- Para o d_9 “diminuição do teor de umidade”, (2º. no ranking do risco) deve-se instalar sistemas de desumidificação do ar dentro do transformador para manter um ambiente interno seco. Verificar regularmente o local de instalação do transformador para garantir que não haja infiltração de água. E garantir que os materiais de isolamento utilizados no transformador sejam resistentes à umidade e mantenham suas propriedades dielétricas.
- Para o d_7 “aumento do teor de umidade”, (3º. no ranking do risco) deve-se realizar processos de secagem do óleo isolante do transformador é uma das medidas mais eficazes para reduzir o teor de umidade, isso pode ser feito através de métodos como vácuo, aquecimento e filtragem do óleo. Colocar

materiais dessecantes, como sílica gel, dentro do transformador pode ajudar a absorver a umidade presente no óleo isolante. E garantir que o transformador esteja adequadamente isolado e protegido contra a entrada de umidade externa, por meio de vedação eficaz e abrigo adequado.

4.2.18. RELATÓRIO E MONITORAMENTO

Chega-se então a fase final onde é realizado o relatório e o monitoramento MHAZOP, que contempla o registro de todas as etapas do MHAZOP, registro de aprovação, relatório de produção, monitoramento e revisão de risco e documentação de revisão. Para isso, é primordial uma exata comunicação e monitoramento da fase MHAZOP, isso levará a um relatório satisfatório onde indicará até que ponto a solução encontrada é confiável.

Destaca-se a importância da geração de alguns documentos, bem como, registro, registro de aprovação, relatório de produção, monitoramento e revisão de risco e documentação de revisão. Para isso, é primordial uma exata comunicação e monitoramento da fase MHAZOP, caso não seja necessário retornar para revisar as etapas anteriores, a finalização é feita nesta etapa, por meio da análise dos resultados e da produção do relatório para o decisor, com as recomendações finais.

Um bom relatório indica ao DM até que ponto a solução pode ser confiável. O decisor deve ser informado sobre a natureza dos modelos e deve compreender que não existe um modelo certo e a utilidade do modelo é a principal questão a ser avaliada (DE ALMEIDA *et al.*, 2015).

Tendo em vista os resultados obtidos através da avaliação da eficácia das ações, espera-se que sejam realizadas periodicamente, tendo em vista de se tratar de riscos críticos ligados a processos suscetíveis aos estados dinâmicos da natureza, onde a intensidade dessas verificações é dada pelo nível de criticidade do perigo que foi ranqueado.

5. CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo será apresentada a conclusão do trabalho e propostas para trabalhos futuros através da aplicação numérica com dados realísticos em transformadores de potência com imersão a óleo desenvolvido ao longo deste trabalho.

O intuito inicial do trabalho era de gerenciar riscos associados a transformadores de potência a óleo. Porém, havia diversos tipos de ferramentas disponíveis que poderiam ser utilizadas em vários contextos, bem como, análise SWOT, análise de árvore de falhas (FTA) e até mesmo o próprio FMEA e HAZOP, que até é utilizada no início da metodologia para indicar as causas e modos de falhas.

Porém, essas metodologias não eram “completas” o bastante para o real problema estudado. Faltavam-lhe uma parte que obtivesse dados quantitativos através de análises probabilísticas, agregação da visão multidimensional do risco e a agregação da estruturada de preferência do decisor no processo de gerenciamento de risco. Daí a real necessidade da busca de um modelo que agregue ao processo de gerenciamento de risco e a abordagem multicritério, como ferramenta de auxílio. No caso, foi utilizado o método MHAZOP, que incorpora a Teoria da Utilidade Multiatributo ao processo de avaliação de risco HAZOP.

O trabalho teve como objetivo geral o desenvolvimento de um estudo e aplicação numérica da metodologia Multidimensional HAZOP (MHAZOP) aplicada em transformadores de potência imersos à óleo de 3000 kVA. Tal desenvolvimento buscou-se as causas dos riscos das falhas, cenários de perigo, suas dimensões de consequências e propostas de ações mitigadoras adequadas para os desvios mais críticos e seu respectivo cenário de perigo, ranquear e priorizar os de maior impacto no uso do equipamento. E para a concretização desse objetivo foram necessários alguns pontos, ou seja, os objetivos específicos, como o desenvolvimento da revisão da literatura sobre gerenciamento de riscos e transformadores, uma fundamentação teórica, propor, contextualizar e executar a aplicação do modelo de gerenciamento em forma de aplicação numérica com dados realísticos, apresentar uma análise dos resultados, ranquear os riscos pelo grau de severidade e propor ações mitigadoras.

Nota-se que o problema proposto tem um impacto social muito forte pois caso haja algum defeito ou explosão de um transformador, causará interrupção no fornecimento de energia que geraria uma interrupção no fornecimento de energia elétrica para residências, empresas e instituições, podendo consequentemente causar inconveniência, perda de produtividade e prejuízos econômicos, dentre outros fatores.

O trabalho teve como limitação apenas os quinze primeiros desvios, deixando os demais desvios como sugestão para trabalhos futuros. Após a aplicação das dezoito etapas da metodologia o decisor pôde observar um resultado bem satisfatório em relação ao ranqueamento dos riscos, destacar os mais críticos que foram em terceiro lugar o d_9 “diminuição do teor de umidade”, em segundo lugar o d_7 “aumento do teor de umidade” e em primeiro lugar como risco que se deve ter uma maior priorização o d_6 “diminuição de fluxo”, e assim ações preventivas/mitigadoras foram propostas para eles. Por fim, foram sugeridas algumas sugestões tanto para enriquecer este trabalho como para novos, além de criação de novas ferramentas e aprimoramento da metodologia para um melhor e mais rápido desempenho em próximas pesquisas.

5.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros a fim de enriquecer ainda mais este trabalho, sugere-se a continuação da aplicação da metodologia MHAZOP nos demais desvios encontrados (que não foram analisados), verificar novas combinações de palavras-guia e parâmetros para buscar mais desvios pelo fato de existirem inúmeras outras combinações, desenvolver novos nós com o intuito de buscar uma nova hierarquia de priorização e possíveis ações de prevenção/mitigação.

Sugere-se também que seja realizada uma aplicação da metodologia em um caso real, em uma empresa ou subestação que necessite desse tipo de estudo, independente do equipamento.

Sugere-se também a criação de um software (ou sistema de apoio a decisão – SAD) e novas ferramentas que possam agilizar o processo de desenvolvimento do MHAZOP, também auxiliar no processo de armazenamento e manipulação dos dados, gestão do módulo matemático, o desenvolvimento das análises intra-critério e inter-critério para se obter uma melhor e mais precisa elicitación da estrutura de preferência do decisor, e por último, não menos importante, um módulo de visualização gráfica para que facilite o entendimento acerca dos riscos envolvidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR 5653-1. **Transformadores de Potência - Parte 1: Generalidades**. São Paulo, Brasil, 2017. Disponível em: <https://www.target.com.br/produtos/normas-tecnicas/40555/nbr5356-1-transformadores-de-potencia-parte-1-generalidades>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ADIL HABEEB, H.; ESMAEL MOHAN, A.; AZMAN ABDULLAH, M.; MUHAMMAD HAZIQ OTHMAN, M.; MAT DAN, R.; HANIF HARUN, M. Predictive maintenance of railway transformer oil based on periodic content analysis. **Jurnal Tribologi**, Malaysia, Melaka, v. 27, p. 71–101, 2020. Disponível em: <http://eprints.utm.edu.my/id/eprint/25182/2/JT-27-71-101.PDF>. Acesso em: 15 fev. 2024.

AMOIRALIS, E. I.; TSILI, M. A.; KLADAS, A. G. Transformer Design and Optimization: A Literature Survey. **IEEE Transactions on Power Delivery**, Iraklio, Grécia, v. 24, n. 4, p. 26, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028763>

ANDREOLI, F.; ZOLI, C. From unidimensional to multidimensional inequality: a review. **Metron**, Roma, v. 78, n. 1, p. 5–42, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40300-020-00168-4>

ATTIYAH, B. A.; ALNUJAIMI, A. A.; ALGHAMDI, M. A. Reliability enhancement of high voltage power transformer using online oil dehydration. *In*: 2019, Wrocław, Poland. **Proceedings - International Conference on Modern Electric Power Systems, MEPS 2019**. Wrocław, Poland: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. p. 4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MEPS46793.2019.9395044>

AVEN, T. Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. **European Journal of Operational Research**, v. 253, n. 1, p. 1–30, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>

BASTOS, A. A. N. N. **Considerações sobre segurança do trabalho em pátios de subestações**. 2010. Trabalho de conclusão de curso - UFCG, Campina Grande, 2010.

BATTAL, F.; BALCI, S.; SEFA, I. Power electronic transformers: A review. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 171, p. 32, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108848>

BAYBUTT, P. The importance of defining the purpose, scope, and objectives for process hazard analysis studies. **Process Safety Progress**, v. 34, n. 1, p. 84–88, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/prs.11682>

BECHARA, R. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 2010. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BELMILOUD, M.; RAISON, B. Case studies of transformers investigations with DGA and winding resistances. *In*: 2014, Grenoble, France. **International Conference on Electrical**

Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM). Grenoble, France: IEEE, 2014. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CISTEM.2014.7076997>

BERNARD N.; CUCEC, B. Methods for monitoring age-related changes in transformer oils. *In*: 2014, Bled, Slovenia. **International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids**. Bled, Slovenia: IEEE, 2014. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICDL.2014.6893173>

BERNARD, N.; CUCEK, B. Compatibility of mineral insulating oil with transformer construction materials. *In*: 2017, Manchester, United Kingdom. **International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids**. Manchester, United Kingdom: IEEE, 2017. p. 3. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICDL.2017.8124727>

BIN, C.; XIAOHUI, L.; HAOWU, L.; LEIJIAO, G. Hybrid subjective and objective evaluation method of the equipment for first class distribution network. **Energy Procedia**, v. 158, p. 3452–3457, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.928>

BRACALE, A.; CARPINELLI, G.; DE FALCO, P. Probabilistic risk-based management of distribution transformers by dynamic transformer rating. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 113, p. 229–243, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2019.05.048>

BUSTAMANTE, K. C.; BORJA, W. P.; MIRANDA, B. B.; ZHUNIO, L. A.; MEDINA, R. D. Power transformers risk index assessment in the ecuadorian context. **CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies**, Curico, Chile, p. 6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICA-ACCA.2016.7778473>

CARNEIRO, C. J.; JARDINI, J. A.; BRITTES, J. L. P. Substation power transformer risk management: reflecting on reliability centered maintenance and monitoring. *In*: 2012, Montevideo, Uruguay. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. Montevideo, Uruguay: IEEE, 2012. p. 8. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319123>

CAUCHICK, M. P. A.; HO, L. L. **Levantamento tipo survey. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações**. Elsevier ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2010.

CHEN, H.; LIU, S.; LIU, Q.; SHI, X.; WEI, W.; HAN, R.; KÜFEOĞLU, S. Estimating the impacts of climate change on electricity supply infrastructure: A case study of China. **Energy Policy**, v. 150, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2020.112119>

CHEN, Z.; MAO, C.; WANG, D.; LU, J.; ZHOU, Y. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 52, n. 4, p. 2778–2788, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIA.2016.2543685>

CHENG, Y.; LI, S.; LU, Z.; LIU, Z.; ZHU, Z. Seismic risk mitigation of cylindrical electrical equipment with a novel isolation device. **Soil Dynamics and Earthquake Engineering**, v. 111, p. 41–52, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.001>

CHRISTOPHER FREY, H.; PATIL, S. R. Identification and review of sensitivity analysis methods. **Risk Analysis an international journal**, v. 22, p. 26, 2002. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/0272-4332.00039>

CORREIA, A.; FERREIRA, L.; COIMBRA, P.; DE ALMEIDA, A. Impacts of automated natural ventilation in the temperature and humidity of a distribution transformer room. *In*: 2020, Setubal, Portugal. **Compatibility in Power Electronics (CPE)**. Setubal, Portugal: IEEE, 2020. p. 8. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CPE-POWERENG48600.2020.9161687>

D'AMICO, P.; MALANDRA, R.; COSTANZO, F.; CASTIGLIEGO, L.; GUIDI, A.; GIANFALDONI, D.; ARMANI, A. Evolution of the anisakis risk management in the European and Italian context. **Food Research International**, Pisa, Italy, v. 64, p. 348–362, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.06.038>

DAS, D.; DIVAN, D. M.; HARLEY, R. G. Power flow control in networks using controllable network transformers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 25, n. 7, p. 1753–1760, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2042076>

DAS, L. N.; GUPTA, S. Electrical power system transmission quality and power supplier micro grid control functional reliability. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, India, v. 11, p. 325–328, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13198-019-00943-1>

DE ALMEIDA, A. T. **Processo de decisão nas organizações**. Editora Atlas S.A ed. São Paulo: 2013, 2013. v. 1.

DE ALMEIDA, A. T.; CAVALCANTE, C. A. V.; ALENCAR, M. H.; FERREIRA, R. J. P.; GARCEZ, V. T.; ALMEIDA-FILHO, A. T. **International series in operations research & management science. Multicriteria and multiobjective models for risk, reliability and maintenance decision analysis**. Springer ed. Switzerland: 2015, 2015. v. 231. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-17969-8>

DE ARAÚJO, E. . B. B. M.; GARCEZ, T. V. Estudo do HAZOP multidimensional (MHAZOP) em transformadores de potência. *In*: 2020, Fós do iguaçu, Paraná. **XL ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Fós do iguaçu, Paraná: ENEGEP, 2020. p. 14–14. Disponível em: https://doi.org/10.14488/enegep2020_tn_stp_349_1796_40454

DE AVILA, M. C.; MUNARO, A. P.; MUNARO, M. Compatibility evaluation of nitrile rubber formulations with insulating fluids (IMO and INE) used in power transformer. **Revista Materia**, v. 27, n. 2, p. 11, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1315>

DUARTE, D. A performace overview about fire risk management in the Brazilian hydroelectric generating plants and transmission network. **Journal of Loss Prevention in the Process Industries**, Recife, Pernambuco, v. 17, n. 1, p. 65–75, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2003.09.007>

DUNJÓ, J.; FTHENAKIS, V.; VÍLCHEZ, J. A.; ARNALDOS, J. Hazard and operability (HAZOP) analysis. A literature review. **Journal of Hazardous Materials**, v. 173, n. 1–3, p. 19–32, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.076>

EMBLEMSVÁG, J. The augmented subjective risk management process. **Management Decision**, v. 48, n. 2, p. 248–259, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/00251741011022608>

FRIDAY, D.; RYAN, S.; SRIDHARAN, R.; COLLINS, D. Collaborative risk management: a systematic literature review. **International Journal of Physical Distribution and Logistics Management**, v. 48, n. 3, p. 231–253, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-01-2017-0035>

GARCEZ, T. V. **Desenvolvimento de estudo para gerenciamento de risco em gasoduto de um sistema de distribuição de gás natural**. 2009. Dissertação de mestrado - UFPE, Recife, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6003>. Acesso em: 15 fev. 2024.

GARCEZ, T. V.; ALENCAR, M. H. Multidimensional HAZOP analysis (MHAZOP): a comprehensive support to decision-making process in risk management. *In*: 2019, Recife, PE. **29th European Safety and Reliability Conference**. Recife, PE: Research Publishing, Singapore, 2019. p. 6. Disponível em: <https://doi.org/10.3850/978-981-11-2724-3>

GARCEZ, T. V.; ALENCAR, M. H. A Proposition of a Multidimensional HAZOP Analysis (MHAZOP) to Support a Decision-Making Process. *In*: **International Series in Operations Research and Management Science**. Recife, PE: Springer Nature Switzerland, 2022. v. 321, p. 111–131. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-030-89647-8_6

GARCÍA, B.; ORTIZ, A.; RENEDO, C.; GARCÍA, D. F.; MONTERO, A. Use performance and management of biodegradable fluids as transformer insulation. **Energies**, Madrid, Spain, v. 14, n. 19, p. 18, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14196357>

GARG, A.; JAIN, A.; VELANDY, J.; NARASIMHAN, C. S.; PATIL, J. D.; BELDAR, S. S. Compatibility of ester oil with transformer components and comparison with mineral oil. *In*: 2019, Navi Mumbai, Mumbai, India. **4th International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems, CATCON 2019**. Navi Mumbai, Mumbai, India: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2019. p. 6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CATCON47128.2019.CN0011>

GEORGESCU, I.; KINNUNEN, J. Multidimensional possibilistic risk aversion. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 54, n. 1–2, p. 689–696, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.03.011>

GHIASIRAD, H.; ASGARI, N.; KHOSHBAKHTI SARAY, R.; MIRMASOUMI, S. Thermo-economic assessment of a geothermal based combined cooling, heating, and power system, integrated with a humidification-dehumidification desalination unit and an absorption heat transformer. **Energy Conversion and Management**, v. 235, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2021.113969>

GOEL, S.; AKULA, A.; GHOSH, R.; SURJAN, B. S. Condition monitoring of transformer using oil and winding temperature analysis. *In*: 2016, Varanasi, India. **IEEE UP Section Conference on Electrical Computer and Electronics (UPCON)**. Varanasi, India: IEEE, 2016. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/UPCON.2016.7894704>

HAJJAR, H. K.; ALSOMALI, A. M. Reducing transformer oil leakages in projects. *In*: 2017, Dhahran, Saudi Arabia. **IEEE GCC Conference & Exhibition**. Dhahran, Saudi Arabia: IEEE, 2017. p. 3. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/IEEEGCC.2017.8448205>

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Reactor and spent fuel safety in the light of the accident at the Fukushima Daiichi nuclear power plant** IAEA. Vienna, Austria: [s. n.], 2012. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/10443/iaea-report-on-reactor-and-spent-fuel-safety-in-the-light-of-the-accident-at-the-fukushima-daiichi-nuclear-power-plant>. Acesso em: 15 fev. 2024.

JI, Z.; SU, H.; WANG, Y.; CAO, Y.; YANG, S. Assessing the risk of hazards with multidimensional consequences for industrial processes. **Processes**, Hangzhou, China, v. 10, n. 6, p. 15, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10061145>

JIN, L.; KIM, D.; ABU-SIADA, A.; KUMAR, S. Oil-immersed power transformer condition monitoring methodologies: A review. **Energies**, v. 15, n. 9, p. 32, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15093379>

KEENEY, R. L.; RAIFFA, H.; RAJALA, D. W. **Decisions with multiple objectives: preferences and value trade-offs**. IEEE ed. New York, EUA: [s. n.], 1979. v. 9. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310245>

LESTRO, L. P. M. **Transformadores de potência a óleo isolante**. 2021. Trabalho de conclusão de curso - UFRJ, Rio de Janeiro, 2021.

LI, J.; LI, Z.; CHEN, J.; BIE, Y.; JIANG, J.; YANG, X. Oil pressure monitoring for sealing failure detection and diagnosis of power transformer bushing. **Energies**, v. 14, n. 23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14237908>

LI, Y.; SHEN, W.; AN, G.; DU, Z.; HE, P.; WU, W.; ZHAO, C.; ZHOU, T.; JIANG, S.; QIAN, X. Comparison of heat transfer characteristics between natural ester oil and mineral oil in large oil-immersed transformer. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 59, n. 4, p. 729–739, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03289-w>

LIMA, S. L.; SAAVEDRA, O. R.; MIRANDA, V. A two-level framework to fault diagnosis and decision making for power transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 30, n. 1, p. 497–504, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2355176>

LÓPEZ, J. C.; MANTOVANI, J. R. S.; SANZ, J. C. Var planning problem considering conditional value-at-risk assessment. *In*: 2014, Chicago, IL, USA. **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**. Chicago, IL, USA: IEEE, 2014. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC.2014.6863472>

LU, S.; XU, Y.; ZHAO, S.; CHEN, G.; CHEN, W.; CHENG, H. Research on method of measurement condition assessment for electronic transformers. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Wuhan, China, v. 113, n. 1, p. 9, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/113/1/012095>

MAHAJAN, S. M.; ROBALINO, D. M.; SIVAN, V. Thermal modeling of an inverted-type oil-immersed current transformer. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 25, n. 4, p. 2511–2518, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2046188>

MARTIN, D.; BECKETT, C.; BROWN, J.; NIELSEN, S. Analysis and mitigation of australian and new zealand power transformer failures resulting in fires and explosions. **IEEE Electrical Insulation Magazine**, v. 35, p. 8, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/MEI.2019.8878255>

MARTIN, D.; MARKS, J.; SAHA, T.; KRAUSE, O.; RUSSELL, G.; ALIBEGOVIC-MEMISEVIC, A. On the development of power transformer failure models: an Australian case study. *In*: 2017, Chicago, IL, USA. **IEEE General Meeting Power & Energy Society**. Chicago, IL, USA: IEEE, 2017. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PESGM.2017.8274571>

MCSHANE, M. Enterprise risk management: history and a design science proposal. **Journal of Risk Finance**, v. 19, n. 2, p. 137–153, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/JRF-03-2017-0048>

MEDINA, R. D.; MORALES, D. X.; TOLEDO, M. A.; CABRERA, J. B. Power transformer risk index assessment for an asset management plan. *In*: 2017, Pucon, Chile. **CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies (CHILECON)**. Pucon, Chile: IEEE, 2017. p. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CHILECON.2017.8229535>

MEHAIRAJAN, R. P. Y.; VAN HATTEM, M.; DJAIRAM, D.; SMIT, J. J. **Risk-based approach to maintenance management applied on power transformers**. Volume 1 ed. Switzerland: Springer International Publishing, 2015. v. 20. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-15536-4_33

MILOSAVLJEVIC, S.; JANJIC, A. Integrated transformer health estimation methodology based on markov chains and evidential reasoning. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2020, p. 12, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2020/7291749>

NASCIMENTO, K. R. S. **Gerenciamento de riscos em desastres naturais: Diagnóstico do contexto atual baseado numa revisão sistemática da literatura sobre eventos natech**. 2016. Dissertação de mestrado - UFPE, Caruaru, Pernambuco, 2016.

NASIR; COOB, J. CM noise reduction of isolated converter by balancing technique. *In*: 2016, Bournemouth, UK. **Anais [...]**. Bournemouth, UK: IEEE, 2016. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PECI.2016.7459219>

NASSIF, A. B.; DONG, M. Characterizing the effect of conservation voltage reduction on the hosting capacity of inverter-based distributed energy resources. **Electronics (Switzerland)**, Edmonton, Canadá, v. 9, n. 9, p. 1–14, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/electronics9091517>

NBR IEC ISO 31010. **Gestão de Riscos - Técnicas para o processo de avaliação de riscos**. [s. l.], 2021. Disponível em: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjcgclcfndmkaj/https://planejamentoestrategico.mcti.gov.br/ar>

quivos/Gestao_Riscos_Tecnicas_%20ABNT%20NBR%20ISO-IEC%2031010-2012.pdf.
Acesso em: 15 fev. 2024.

NÉMETH, B.; EKONOMOU, L. **Flexitranstore - Special session in the 21st international symposium on high voltage engineering (ISH 2019)**. Springer Open ed. Cham, Switzerland: [s. n.], 2020. v. 610. *E-book*. Disponível em: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-37818-9>

OLMO, C.; MÉNDEZ, c.; QUINTANILLA, P. J.; ORTIZ, F.; RENEDO, C. J.; ORTIZ, A. Mineral and ester nanofluids as dielectric cooling liquid for power transformers. **Nanomaterials**, Santander, Spain, v. 12, p. 41, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/nano12152723>. Acesso em: 15 fev. 2024.

UGHTON, E. J.; SKELTON, A.; HORNE, R. B.; THOMSON, A. W. P.; GAUNT, C. T. Quantifying the daily economic impact of extreme space weather due to failure in electricity transmission infrastructure. **Space Weather**, v. 15, n. 1, p. 65–83, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/2016SW001491>

PANFILOV, D. I.; ZHURAVLEV, I. I.; ASTASHEV, M. G. Designing of static VAR compensators with voltage regulators. *In*: 2019, Moscow, Russia. **International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)**. Moscow, Russia: IEEE, 2019. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/EEEIC.2019.8783821>

PANTERI R.; ENGENHARIA 360. **Quais as principais diferenças entre transformadores a óleo e a seco?**. [s. l.], 2023. Disponível em: <https://engenharia360.com/diferencas-transformadores-a-oleo-e-a-seco/>. Acesso em: 15 fev. 2024.

PAULA, M. X.; SANTI, A. M. M. Gerenciamento de risco de incêndio em transformadores elevadores de potência instalados em usina hidrelétrica de grande porte. *In*: 2018, Maceió, Alagoas. **XXXVIII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. Maceió, Alagoas: ENEGEP, 2018. p. 23. Disponível em: https://doi.org/10.14488/enegep2018_tn_stp_261_501_35918

PERIN, S. Transformer design review-Important step in the technical risk management of the transformer procurement and design / manufacturing process. *In*: 2014, Perth, Australia. **Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC**. Perth, Australia: IEEE, 2014. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/AUPEC.2014.6966614>

PHADUNGTHIN, R.; HAEMA, J. Risk management model of 69 kV power transformer bushing in metropolitan substation. *In*: 2017, Bangkok, Thailand. **4th International Conference on Industrial Engineering and Applications**. Bangkok, Thailand: [s. n.], 2017. p. 4.

POISS, G.; VITOLINA, S.; MARKS, J. Development of indicator based on oil analysis for estimating risk level of power transformers. *In*: 2016, Riga, Latvia. **International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)**. Riga, Latvia: 57th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 2016. p. 4. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/RTUCON.2016.7763130>

POLANSKI, A.; STOJA, E.; ZHANG, R. Multidimensional risk and risk dependence. **Journal of Banking and Finance**, v. 37, n. 8, p. 3286–3294, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2013.04.022>

RAJABI, E.; BAZYAR, J.; DELSHAD, V.; KHANKEH, H. R. The evolution of disaster risk management: historical approach. **Disaster Medicine and Public Health Preparedness**, Tehran, Iran, v. 16, n. 4, p. 1623–1627, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/dmp.2021.194>

RALPH L.; KEENEY. **Value-focused thinking: A path to creative decisionmaking**. ed. 1 fevereiro 1996 ed. Boston: 19 May 2014, 1992. v. 2. *E-book*. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=SeXsAAAAMAAJ>. Acesso em: 15 fev. 2024.

READ, J. L.; FIRN, J.; GRICE, A. C.; MURPHY, R.; RYAN-COLTON, E.; SCHLESINGER, C. A. Ranking buffel: Comparative risk and mitigation costs of key environmental and socio-cultural threats in central Australia. **Ecology and Evolution**, v. 10, n. 23, p. 12745–12763, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ece3.6724>

RIEGLER, S.; SCHWEIGER, E.; Ettl, C.; STÖSSL, M.; BOSE, S. Recommendation of site commissioning tests for rapid recovery transformers with an installation time less than 30 hours. **Elektrotechnik und Informationstechnik**, v. 135, n. 8, p. 543–547, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0669-5>

ROMERO, A. A.; MOMBELLO, E. E.; RATTÁ, G. An overview on power transformer management: individual assets and fleets. *In*: 2012, Montevideo, Uruguay. **IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America**. Montevideo, Uruguay: IEEE, 2012. p. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC-LA.2012.6319081>

ROSENHEAD J.; MINGERS J. **Rational analysis for a problematic world revisited: Problem structuring methods for complexity, uncertainty and Conflict**. 2nd Edition ed. [S. l.: s. n.]. *E-book*. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-us/Rational+Analysis+for+a+Problematic+World+Revisited%3A+Problem+Structuring+Methods+for+Complexity%2C+Uncertainty+and+Conflict%2C+2nd+Edition-p-9780471495239>. Acesso em: 15 fev. 2024.

ROSLAN, M. H.; AZIS, N.; AB KADIR, M. Z. A.; JASNI, J.; IBRAHIM, Z.; AHMAD, A. A simplified top-oil temperature model for transformers based on the pathway of energy transfer concept and the thermal-electrical analogy. **Energies**, Malaysia, v. 10, n. 11, p. 15, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en10111843>

SONI, R.; MEHTA, B. A review on transformer condition monitoring with critical investigation of mineral oil and alternate dielectric fluids. **Electric Power Systems Research**, Gandhinagar, India, v. 214, p. 108954, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108954>

SOUSA, J. C. S. **Operação em emergência de transformadores de potência considerando riscos e contratos de interrupção**. 2017. Dissertação de metrado - Universidade Federal do Maranhão, São Luiz - MA, 2017.

SOUZA, D. F. de; MARTINHO, E.; MARTINHO, M. B.; JUNIOR, W. A. M. **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2023 - Ano base 2022**. 1. ed.

ed. Salto, São Paulo: Associação Brasileira para a Conscientização dos Perigos da Eletricidade - Abracopel, 2023. v. 1. Disponível em: <https://doi.org/10.29327/5194308>

SUWANASRI, T. Y.; SUWANASRI, C.; PHADUNGTHIN, R. Risk assessment based on condition and importance criteria for power transformer in Thailand transmission network. **Transactions on Electrical and Electronic Engineering**, v. 10, n. 1, p. 18–27, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/tee.22061>

TAKAMI, K. M.; MAHMOUDI, J. A novel study on the power transformer losses in relation to CO₂ capturing technology. *In*: 2008, Tehran, Iran. **International Journal of Energy Research**. Tehran, Iran: Wiley InterScience, 2008. p. 1151–1163. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/er.1452>

TEE, S. J.; LIU, Q.; WANG, Z. Insulation condition ranking of transformers through principal component analysis and analytic hierarchy process. **IET Generation, Transmission and Distribution**, v. 11, n. 1, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.0589>

TEPELI, E.; TAILLANDIER, F.; BREYSSE, D. Multidimensional modelling of complex and strategic construction projects for a more effective risk management. **International Journal of Construction Management**, Talence, France, v. 21, n. 12, p. 23, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/15623599.2019.1606493>

THERON, J. C. J.; ROH, D.; CLARK, L. Case study: Transformer differential incorrect operation due to system grounding. *In*: 2021, Edmonton, Canadá. **2021 74th Conference for Protective Relay Engineers, CPRE 2021**. Edmonton, Canadá: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p. 18. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CPRE48231.2021.9429856>

TU, C.; XIAO, F.; LAN, Z.; SHUAI, Z. Research of the high supply voltage quality control for solid-state transformer. **IET Power Electronics**, v. 11, n. 11, p. 1–8, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2017.0926>

WU, Z.; LIU, W.; NIE, W. Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 112, n. 5/6, p. 28–1409, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06425-0/Published>

XU, L.; ZOU, A.; JIE, F.; MIAO, Y.; BAI, J. Development and simulation evaluation of a magnetorheological elastomer isolator for transformer vibration control. *In*: 2018, China. **Chinese Control and Decision Conference, CCDC**. China: IEEE, 2018. p. 5.

YU, H.; XIONG, W.; XU, K.; YU, Y.; YUAN, X.; ZOU, X.; XIAO, L. A risk assessment method of power transformer based on three-parameter interval grey number decision-making. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 12, n. 7, p. 18, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/app12073480>

ZHALEFAR, F.; PASAND, M. S. Transformer winding detailed modeling for protection studies. *In*: 2006, Theran, Iran. **IEEE Power India Conference**. Theran, Iran: IEEE, 2006. p. 6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/POWERI.2006.1632573>

ZHANG, J.; XU, L.; WU, X.; QIAN, Z. A precise passive current balancing method for multioutput LED drivers. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 8, p. 2149–2159, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2104332>

ZHANG, L.; LIANG, D.; WEN, Q.; LIU, H.; LIU, Y.; GAO, Y.; WU, Z.; WANG, C.; TANG, L. Multiple protection strategies for hybrid distribution transformer based on DC-link voltage fault-tolerant control. *In*: 2021, **2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, ECCE 2021 - Proceedings.**: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p. 1274–1279. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ECCE47101.2021.9595292>

ZHOU, B.; CHEN, J.; WU, Q.; PAMUČAR, D.; WANG, W.; ZHOU, L. Risk priority evaluation of power transformer parts based on hybrid fmea framework under hesitant fuzzy environment. **Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering**, v. 20, n. 2, p. 399–420, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.22190/FUME220223013Z>

ZHU, L.; HAO, J.; LU, L. Research on influence of damping on the vibration noise of transformer. **IEEE Access**, v. 10, p. 92128–92136, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3201646>

ZIOMEK, W.; VIJAYAN, K.; SANDERS, D. G. Advanced transformer fleet monitoring system. *In*: 2014, Winnipeg, MB, Canadá. **IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition**. Winnipeg, MB, Canadá: IEEE, 2014. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TDC.2014.6863555>

ZITONG, H.; XU, Y.; GUO, C.; MA, H. Research on power supply of monitoring equipment based on adaptive voltage stabilization control. *In*: 2021, **Proceedings - 2021 Power System and Green Energy Conference, PSGEC 2021.**: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p. 269–275. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PSGEC51302.2021.9541869>

ZOU, A.; XU, L.; ZHU, M.; QI, S.; YU, M. Fuzzy control study on a transformer vibration isolation system. *In*: 2018, China. **Chinese Control and Decision Conference, CCDC**. China: IEEE, 2018. p. 5. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/CCDC.2018.8407633>