

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

Isabella Salustiano da Silva

**Aplicação da Metodologia FMEA para Análise de Falhas em
Transformadores de Potência**

**Ilha Solteira
2024**



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus de Ilha Solteira

Isabella Salustiano da Silva

**Aplicação da Metodologia FMEA para Análise de Falhas em
Transformadores de Potência**

Trabalho de graduação apresentado à
Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira –
Unesp como parte dos requisitos para
obtenção do título de bacharelado em
Engenharia Elétrica.

Nome do orientador
Prof. Dr. Miguel Ângelo Menezes

Ilha Solteira
2024

FICHA CATALOGRÁFICA
Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

Silva, Isabella Salustiano da.
S586a Aplicação da metodologia FMEA para análise de falhas em transformadores de potência / Isabella Salustiano da Silva. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024
52 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Elétrica) -
Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Ilha Solteira,
2024

Orientador: Miguel Angelo Menezes

Inclui bibliografia

1. Manutenção. 2. Transformador. 3. Falha. 4. FMEA. 5. Confiabilidade.

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Aos 24 dias do mês de Janeiro do ano de dois mil e vinte e cinco, as 18h00min, por videoconferência, no Departamento de Engenharia Mecânica, do Campus da UNESP, da Faculdade de Ilha Solteira, a discente **Isabella Salustiano da Silva**, matriculado sob o número 172054631, no Curso de Engenharia Elétrica, tendo como banca examinadora, o orientador Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes, a Engenheira Mecânica Gabriela Lima Silva (GE Healthcare) e o Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches (DEE) apresentou o Trabalho de Graduação intitulado: “*Aplicação da Metodologia FMEA para Análise de Falhas em Transformadores de Potência*”, obtendo a nota 10,0 (dez) e conceito Aprovado.



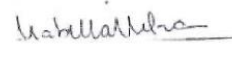
Prof. Ph.D. Miguel Ângelo Menezes
Orientador



Eng^a. Mec. Gabriela Lima Silva
Membro da Banca



Prof. Dr. Marcelo Augusto Assunção Sanches
Membro da Banca



Isabella Salustiano da Silva
Discente

Dedico a realização deste trabalho
aos meus pais, Eliete e Valmir.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, e aos guias espirituais pela saúde e amparo durante a minha trajetória, e a bênção de mais esta conquista.

Aos meus pais, Eliete e Valmir, pelo suporte e amor incondicional que sempre me foi concedido ao longo de toda a minha trajetória. E ao meu namorado Matheus pelo seu carinho, paciência e incentivo que foram cruciais para finalização desta fase.

Ao professor Miguel, sou grato pelo conhecimento compartilhado ao longo da graduação e pela orientação precisa e criteriosa, que foram essenciais para o êxito deste trabalho.

Por fim, agradeço à UNESP de Ilha Solteira, aos seus docentes, técnicos e demais colaboradores, pela qualidade de ensino essencial para o meu desenvolvimento profissional.

RESUMO

Tem-se como proposta o desenvolvimento da aplicação da metodologia FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) para análise de falhas em transformadores de potência visando obter a confiabilidade dos componentes críticos em sistemas de energia elétrica. O FMEA é uma ferramenta sistemática e estruturada que auxilia na identificação dos possíveis modos de falha, suas causas e efeitos, permitindo a priorização de ações corretivas ou preventivas para mitigar os riscos associados. Os transformadores de potência, são de extrema importância para o sistema elétrico, desta forma, seus componentes deve-se abordar uma análise dos seus diferentes componentes, englobando todas as partes, como por exemplo: sistema de isolamento, resfriamento, enrolamento, núcleo, buchas e ligações. Cada um dos componentes são avaliados quanto aos modos de falha potenciais, de acordo com a frequência registrada em um levantamento de literatura técnica, e a maneira como suas consequências e severidade afetam o desempenho do equipamento durante sua vida útil. Com esses dados obtidos através da tabela do FMEA, é possível calcular o RPN (*Risk Priority Number*), priorizando os componentes os críticos. Os resultados obtidos do presente trabalho mostraram que a bucha, o sistema de proteção e controle (relé de gás e indicador de nível de óleo), o sistema isolante (óleo isolante), comutador, enrolamento deve ser priorizados, devido a combinação dos índices de severidade, ocorrência e detecção.

Palavras-chave: Transformador de potência; FMEA; Falha; Manutenção; Confiabilidade.

ABSTRACT

The proposal is to develop the application of the FMEA (Failure Modes and Effects Analysis) methodology for analyzing failures in power transformers in order to obtain the reliability of critical components in electrical energy systems. The FMEA is a systematic and structured tool that helps identify possible failure modes, their causes and effects, allowing the prioritization of corrective or preventive actions to mitigate the associated risks. Power transformers are extremely important for the electrical system; therefore, their components must present good performance, enabling a thorough functional analysis of their different components, encompassing all parts: insulation system, cooling, winding, core, bushings, and connections. Each of the components being evaluated for potential failure modes, according to the with the frequency recorded in a survey of technical literature, and the way in which its consequences and severity affect the performance of the equipment during its useful life. With this data obtained through the FMEA table, it is possible to calculate the RPN (*Risk Priority Number*), prioritizing the most critical components. The results obtained from this work showed that the bushing, the protection and control system (gas relay and oil level indicator), the insulating system (insulating oil), switch, and winding should be prioritized, due to the combination of severity, occurrence, and detection indices.

Keywords: Power transformer; FMEA; Failure; Maintenance; Reliability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Núcleo: Relação de Transformação.....	15
Figura 2.	Construção Transformador de Potência.....	16
Figura 3.	Cadeia de Conversão de Energia – Sistema Elétrico.....	18
Figura 4.	Tipos de Transformadores de Potência no Sistema Elétrico.....	19
Figura 5.	Esquema Transformador Elevador o Sistema Elétrico.....	19
Figura 6.	Esquema Transformador Transmissão e Subtransmissão no Sistema Elétrico.....	20
Figura 7.	Esquema Transformador de Distribuição no Sistema Elétrico.....	21
Figura 8.	Evolução da Manutenção.....	23
Figura 9.	Procedimento Sistemático Geral do FMEA.....	29
Figura 10.	Processo de Desenvolvimento do FMEA.....	31
Figura 11.	Cálculo do RPN.....	40
Figura 12.	Análise do RPN dos Componentes.....	42
Figura 13.	Quebra da Porcelana da Bucha.....	43
Figura 14.	Danos Gerados por Curto-Circuito na Bucha.....	43
Figura 15.	Aplicação das Ações Recomendadas.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Principais componentes	17
Tabela 2.	Conceitos básicos FMEA	27
Tabela 3.	Formulário de Registro do FMEA	28
Tabela 4.	Análise Funcional dos Componentes.....	32
Tabela 5.	Análise dos Modos de Falha.....	33
Tabela 6.	Análise das Causas de Falha.....	35
Tabela 7.	Análise dos Efeitos de Falha.....	37
Tabela 8.	Classificação Nível de Ocorrência de Risco.....	39
Tabela 9.	Classificação do Nível de Severidade.....	39
Tabela 10.	Classificação do Nível de Detecção.....	40

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BT	Baixa tensão
FMEA	<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
MCC	Manutenção Centrada na Confiabilidade
RCM	Manutenção Centrada em Confiabilidade
RPN	<i>Risk Priority Number</i>

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	12
1.1	Justificativa	13
2.	OBJETIVO	14
3.	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA	15
3.1	Principais Componentes do Transformador.....	17
3.2	Tipos de Transformadores de Potência	18
3.2.1	Transformadores Elevadores.....	19
3.2.2	Transformadores de Transmissão e Subtransmissão	20
3.2.3	Transformadores de Distribuição.....	21
4.	MANUTENÇÃO E SUA APLICAÇÃO.....	22
4.1	História da Manutenção	22
4.2	Tipos de Manutenção	24
4.3	FMEA (<i>Failure Modes and Effects Analysis</i>)	26
4.3.1	Avaliação de Risco.....	29
5.	METODOLOGIA	31
5.1	FMEA Aplicada aos Componentes	32
5.1.1	Conhecimento dos Componentes e Análise Funcional	32
5.1.2	Determinação dos Modos de Falha	33
5.1.3	Levantamento das Causas de Falha	35
5.1.4	Verificação dos Efeitos de Falha	36
5.1.5	Determinação dos Índices de Ocorrência, Severidade e Detecção.....	39
5.1.6	Cálculo RPN (<i>Risk Priority Number</i>).....	40
6.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
6.1	Identificação dos Componentes Críticos	42
7.	CONCLUSÃO.....	45
7.1	Sugestão para Trabalhos Futuros	46
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	47
	APÊNDICE	49

1. INTRODUÇÃO

Os transformadores de potência são equipamentos que compõem os sistemas elétricos, que devido a sua função de conversão de níveis de tensão, são capazes de estar presentes em diferentes finalidades operacionais para o fornecimento de energia elétrica. Esses equipamentos são estáticos, com capacidade de elevar ou reduzir o nível de tensão conforme, operação e o tipo de aplicação desejada, resultando na minimização de perdas e estabilidade durante o processo de geração, transmissão e distribuição de eletricidade. Entretanto, devido sua complexidade de construção, tecnologia, e alto custo de aquisição, pois se trata de um equipamento artesanal com baixa possibilidade de digitalização e automação, torna-se um componente crítico nos sistemas elétricos, com a necessidade de uma gestão de risco precisa em sua manutenção. Isto, em razão de apresentar condições de operação por anos, o que acarreta a redução da vida útil do equipamento, comprometendo o seu funcionamento regular, onde a falha de um único equipamento pode comprometer a continuidade do fornecimento de eletricidade e gerar custos significativos relacionados à interrupção do serviço (PENA, 2003).

Embora tenha havido avanços tecnológicos com a aplicação de digitalização para monitoramento das condições de funcionamento dos transformadores de potência, as falhas que ocorrem, continuam sendo uma dificuldade relevante para a indústria. Frontin (2013) apontou que as falhas nos transformadores são causas determinantes para o desligamento forçado de equipamentos, um fenômeno que ocorre quando um equipamento ou linha de transmissão é retirado de operação de forma inesperada devido a falhas. Para identificação da origem das falhas, frequentemente desconhecidas, é necessária uma investigação com métodos de inspeção que vão desde a parte ativa do equipamento até os acessórios para determinar um plano de ação corretivo, priorizando os componentes críticos, o que torna a prevenção e a gestão de riscos ainda mais desafiador. Esse panorama evidencia a necessidade de uma abordagem mais detalhada da análise de falhas, apresentando o papel fundamental da manutenção em transformadores de potência, ampliando as possibilidades de mitigação de falhas, o que, por sua vez, eleva a complexidade da gestão de manutenção e da operação segura desses ativos.

Levando em consideração essa realidade, torna-se indispensável a utilização de metodologias de manutenção para realização de análise de falhas. A ferramenta FMEA (*Failure Modes and Effects Analysis*) segundo a norma NBR 5462 (1994), é um método qualitativo de análise de confiabilidade que envolve o estudo dos modos de falhas que podem existir para cada item, e a determinação dos efeitos de cada modo de falha sobre os outros itens e sobre a função específica do conjunto. Essa metodologia sistemática é eficiente para conseguir identificar, avaliar e priorizar os modos de falha e seus respectivos efeitos nos transformadores de potência, organizando e classificando as falhas baseadas no seu impacto ao equipamento, conforme cálculo realizado que auxilia na definição de plano de ações preventivo. Ao proporcionar uma análise aprofundada das falhas esperadas nas condições de operação contínua do transformador, espera-se melhorar a confiabilidade, priorizar ações para redução ou eliminação de falhas relacionadas à operação desses equipamentos, contribuindo na segurança do fornecimento de energia elétrica.

1.1 JUSTIFICATIVA

Os transformadores de potência são equipamentos fundamentais para o funcionamento do sistema elétrico, devido sua função de fornecimento de energia elétrica. Apesar desses apresentarem índices relativamente baixos de falhas, devido, sua alta confiabilidade, a ocorrência de falhas imprevistas pode gerar consequências severas, tanto em fatores operacionais como em fatores financeiros, levando em consideração, complexidade do equipamento e a sua importância para o sistema elétrico. Portanto, a pergunta central deste trabalho é: Como a aplicação da metodologia FMEA contribui para a melhoria da confiabilidade e otimização das estratégias de manutenção em transformadores de potência?

A manutenção centrada em confiabilidade (RCM) possui as metodologias adequadas, como o FMEA, de modo a garantir a minimização dos impactos gerados pela ocorrência de falhas. Em razão de seguirem um plano sistemático detalhado com foco nos componentes críticos que acarretam na mitigação das falhas, confiabilidade do sistema elétrico, redução de custos operacionais e na ampliação da vida útil do equipamento.

O motivo da escolha desse tema está relacionado a experiência profissional vivida na Siemens Energy, na área de manutenção de transformadores de potência.

2. OBJETIVOS

Desenvolver um estudo com foco em analisar as falhas em transformadores de potência com o uso da metodologia FMEA, como forma de priorizar as ações no plano de manutenção preventiva do sistema elétrico.

Nesse contexto, o propósito é entender o funcionamento dos componentes do transformador para relacionar os principais modos de falhas, quantificar sua gravidade, ocorrência e probabilidade de detecção, para obter o cálculo do número de risco, que vai garantir o grau de importância durante a tomada de decisões em situações de gerenciamento de manutenção, em razão disso inclui-se:

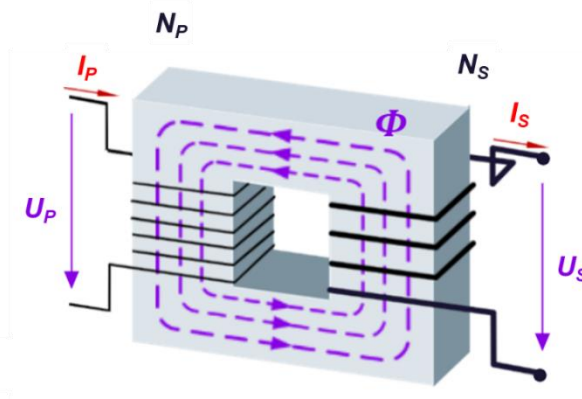
- Elaboração e desenvolvimento do formulário de avaliação de risco do FMEA para modelagem dos modos de falha dos transformadores;
- Análise de funcionamento dos componentes do transformador para aplicação da ferramenta FMEA, e identificar falhas potenciais, além de fornecer valores que serão utilizados para determinação dos índices para cálculo do RPN;
- Dominar os conceitos manutenção e confiabilidade e sua importância para no gerenciamento do equipamento;
- Pontuar e priorizar os riscos aos transformadores, com base nos resultados obtidos no formulário de avaliação de risco, identificando os componentes críticos e otimizar manutenção garantindo a confiabilidade;

3. TRANSFORMADOR DE POTÊNCIA

O transformador de potência é o principal protagonista no sistema elétrico, um equipamento elétrico estático que, por indução magnética, transforma tensão e corrente alternada entre dois ou mais enrolamentos, sem alteração de frequência, conforme descrito pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (NBR, 5462).

O enrolamento que recebe a tensão da rede é o enrolamento primário (U_p), e o que fornece a tensão para a carga será o secundário (U_s), conforme Figura 1. O fluxo magnético é gerado pela mudança de valores de tensão e corrente obtido pela relação de transformação, segundo número de espiras que cada enrolamento possui. Essa regra pode ser descrita pela equação 1.

Figura 1. Núcleo: Relação de Transformação



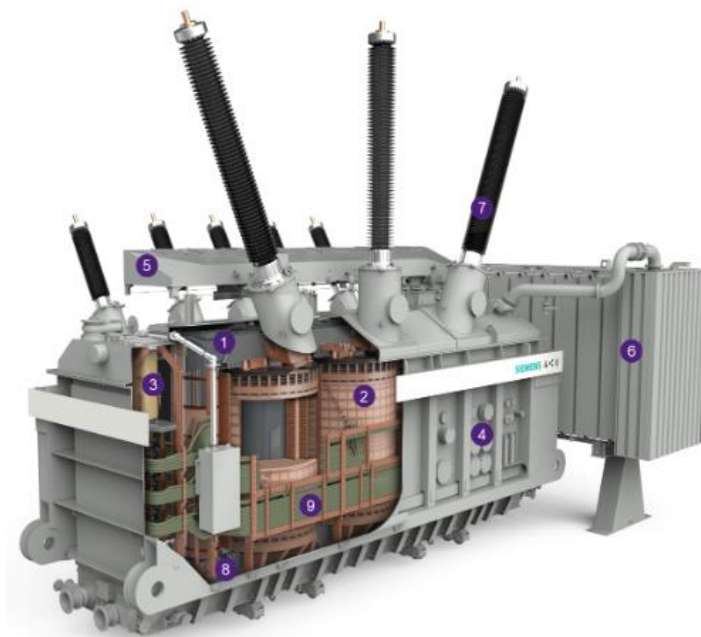
Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

$$R_T = \frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s} = \frac{I_s}{I_p} \quad (1)$$

- R_T - Relação de transformação;
- U_p - Tensão no enrolamento primário (V);
- U_s - Tensão no enrolamento secundário (V);
- N_p - Número de espiras no enrolamento primário;
- N_s - Número de espiras no enrolamento secundário;
- I_p - Corrente no enrolamento primário (A);
- I_s - Corrente no enrolamento secundário (A).

Esse dispositivo utiliza o princípio da indução mútua para realizar a transferência de energia elétrica entre seus enrolamentos primário e secundário, sendo essa transferência dependente do grau de acoplamento magnético entre as bobinas (SOUZA, 2008). Diferente de outros equipamentos eletromecânicos, um transformador de potência, como na Figura 2, não possui partes móveis, o que teoricamente elimina desgastes mecânicos, caso ele opere em condições ideais; todavia, a realidade é outra já que o fluxo magnético dispõe de esforços mecânicos nos enrolamentos, como é considerado a parte ativa (interna) a manutenção acaba sendo mais complexa e invasiva, reforçando a importância de um acompanhamento da manutenção com o ativo.

Figura 2. Construção Transformador de Potência



Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

1. Núcleo
2. Enrolamentos
3. Comutador
4. Tanque e Acessórios
5. Conservador de Óleo
6. Sistema de Resfriamento
7. Buchas
8. Sistema de Isolante
9. Ligações

3.1 PRINCIPAIS COMPONENTES DO TRANSFORMADOR

O transformador de potência, é robusto para ser apto a converter altos níveis de tensão, com a vantagem de ser compacto. A sua funcionalidade está diretamente relacionada à integridade de seus principais componentes, sendo composto por enrolamentos, núcleo, buchas, comutadores, sistemas de resfriamento, ligações, tanque, sistema isolante e acessórios diversos, segundo Figura 2.

Assim, o estudo detalhado do funcionamento, componentes e características específicas dos transformadores é fundamental para otimizar sua aplicação e manutenção, garantindo o desempenho confiável do sistema elétrico (SOUZA, 2008). A tabela 1, apresenta os componentes das principais partes do transformador de potência.

Tabela 1. Principais componentes do transformador

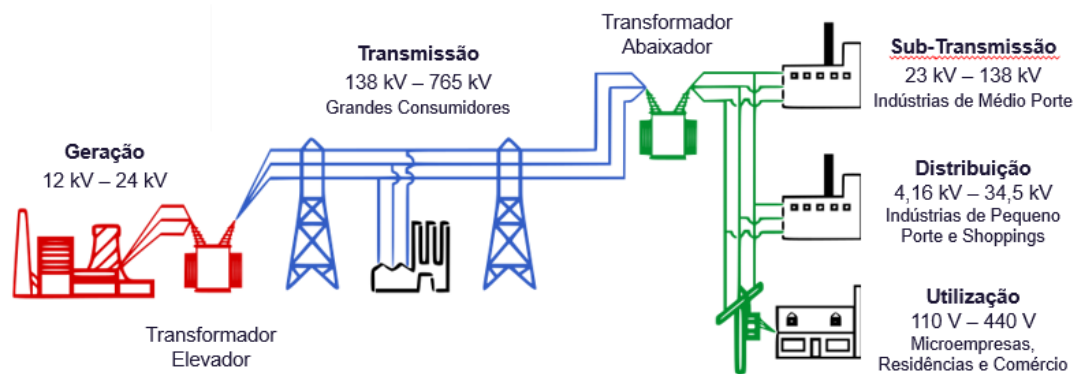
Sistema do Transformador	Componente
Parte Ativa	Núcleo
	Enrolamento
	Comutador
Sistema de Isolamento	Papel Isolante
	Óleo Isolante
Sistema de Resfriamento	Radiador
	Ventiladores
	Trocador de Calor
Controle e Proteção	Relé de Gás (Buchholz)
	Indicador de Temperatura
	Válvula de Alívio
	Secador de Ar
Tanque	Tanque
	Tampa Principal
	Conservador
	Bolsa de Borracha
Acessórios	Buchas

Fonte: Próprio Autor

3.2 TIPOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

Os transformadores de potência são classificados de acordo com o número de fases, sendo trifásicos ou monofásicos, e apresentam variações em relação à classe de tensão e potência, dependendo das exigências do sistema elétrico. Eles são amplamente utilizados em diversas aplicações, desde subestações de energia até grandes consumidores, estando presente em toda a cadeia de conversão de energia, como mostrado na figura 3.

Figura 3. Cadeia de Conversão de Energia – Sistema Elétrico

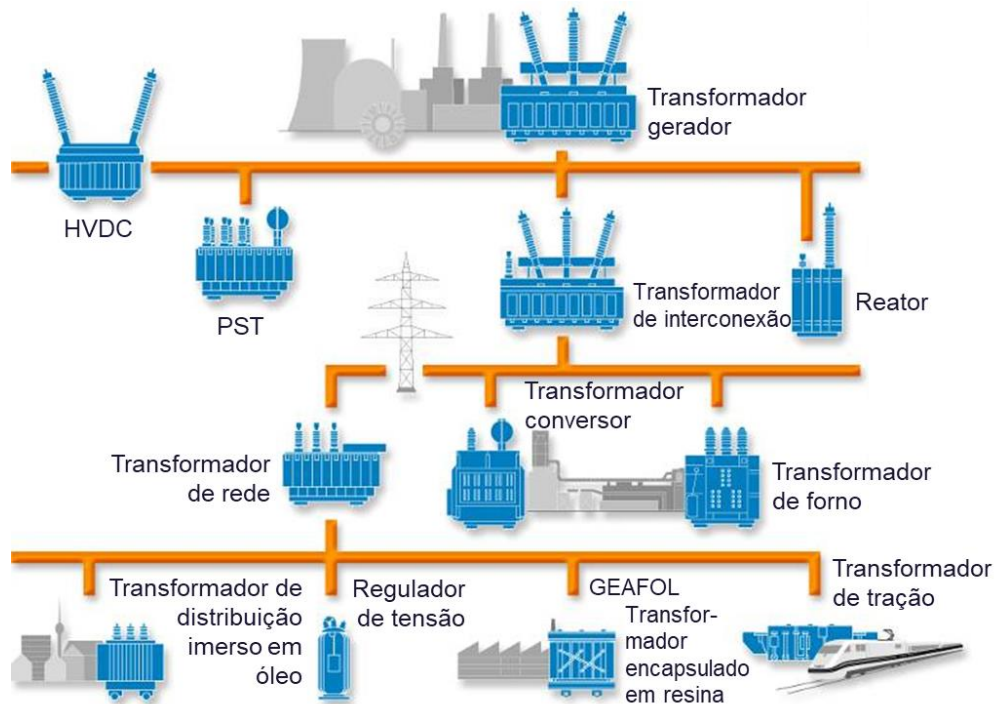


Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

1. Vermelho - Geração
2. Azul - Geração
3. Verde - Distribuição e Subtransmissão
4. Preto - Consumidor

Na Figura 4 são apresentados os tipos de transformadores de potência no sistema elétrico.

Figura 4. Tipos de Transformadores de Potência no Sistema Elétrico

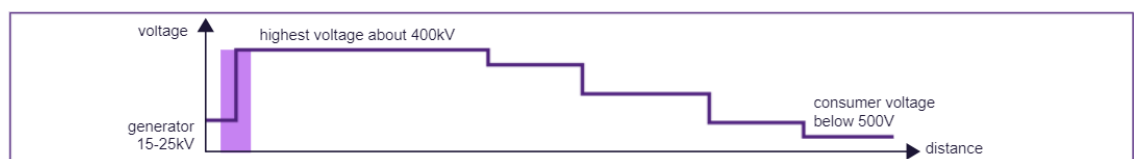


Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

3.2.1 TRANSFORMADORES ELEVADORES

Os transformadores utilizados para elevar o nível de tensão produzida pelos geradores, normalmente ficam localizados no sistema de geração sendo o primeiro transformador da cadeia de conversão, conforme mostra a figura 5:

Figura 5. Esquema Transformador Elevador o Sistema Elétrico



Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

O enrolamento primário que é considerado como baixa tensão, fica conectado no gerador, e o enrolamento secundário é ligado à carga alimentada pelo transformador, sendo considerado como alta tensão onde ocorre a elevação do nível de tensão para a transmissão.

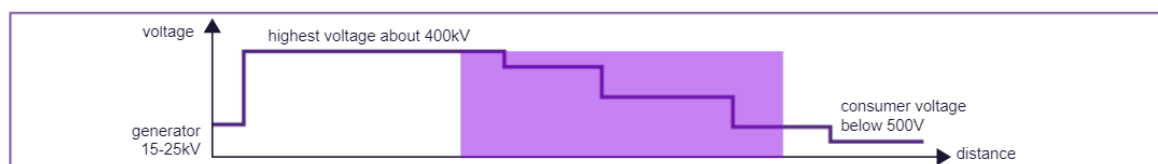
Geralmente são encontrados com níveis de tensão primária de até 12kV - 24kV e nível secundário de 138 kV – 765 kV. Esse tipo de transformador opera com sistema de comutador de derivação sem carga, com baixa faixa de regulação.

Esses transformadores geralmente são projetos customizados, adaptados às necessidades do cliente, requerem alta manutenção e monitoramento pois os estresses causados nos enrolamentos são altos, por ação da operação perto da carga máxima. Portanto, nos projetos do equipamento ocorrem falhas resultantes das correntes extremamente altas nos enrolamentos de BT.

3.2.2 TRANSFORMADORES DE TRANSMISSÃO E SUBTRANSMISSÃO

São transformadores utilizados para conectar sistemas de transmissão com diferentes tensões, ficam localizados em diversas partes do sistema elétrico principalmente em subestações, entretanto, os transformadores de Subtransmissão são utilizados para rebaixar os níveis de tensão das linhas de transmissão para alimentar os consumidores, conforme ilustrado a figura 6.

Figura 6. Esquema Transformador Transmissão e Subtransmissão no Sistema Elétrico



Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

Esses operam usufruindo de 50% - 70% da potência nominal, resultando em menor esforço mecânico aplicado na parte ativa o que implica em menos manutenção e monitoramento, pelo fato de possuir comutador sob carga, onde

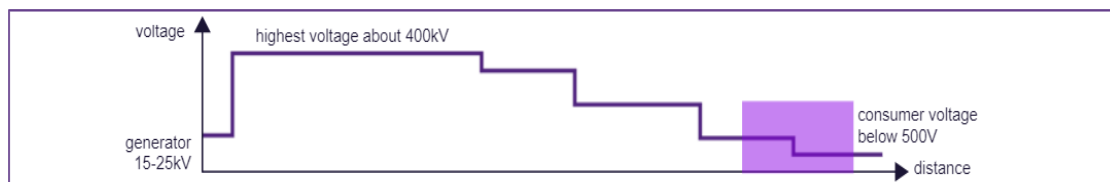
ocorre a mudança de posição dos contatos para ajustar os diferentes níveis de tensão durante o funcionamento do equipamento; aumentando a faixa de regulação, que permite adequar o seu funcionamento as necessidades presentes no sistema, sendo mais flexível na operação, mantendo a estabilidade.

Os transformadores geralmente trifásicos são encontrados no sistema de transmissão com níveis de tensão primária de até 765kV, nível secundário de até 550kV e terciário de 13,8 ou 69Kv, e nos transformadores de Subtransmissão com níveis de tensão primária de até 138kV, nível secundário até 34,5kV.

3.2.3 TRANSFORMADORES DE DISTRIBUIÇÃO

O último transformador da cadeia de conversão de energia do sistema elétrico, são transformadores de pequeno porte com níveis de tensão primária de até 34,5kV e secundário de até 440V alimentando os consumidores finais. São produzidos em massa, devido à baixa complexidade de construção e alto nível de padronização, geralmente operando sob baixa carga.

Figura 7. Esquema Transformador de Distribuição no Sistema Elétrico



Fonte: LUZ, MAURÍCIO V. F. DA (2014)

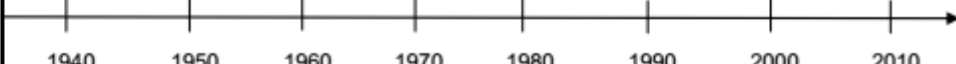
4. MANUTENÇÃO E SUA APLICAÇÃO

A manutenção se tornou a grande responsável em manter os equipamentos e máquinas nas condições ideais de funcionamento, concentrando conceitos técnicos e, assumindo um papel estratégico na indústria, que garante a confiabilidade, a disponibilidade e a segurança dos equipamentos industriais. De acordo com Monchy (1987), o propósito da manutenção se pode comparar a "medicina das máquinas", pois ela é responsável por preservar a funcionalidade e a eficiência dos sistemas durante o seu ciclo de vida. No decorrer do avanço das tecnologias e o aumento da complexidade dos equipamentos devido aos processos de automatização, a manutenção deixou de ser uma atividade não planejada para se tornar um componente com poder de gerar e prever eventos, sendo uma estratégia industrial, já que envolve como fator principal, o custo. Sua influência se estende não apenas a operação contínua dos ativos, mas também à qualidade dos produtos, a segurança operacional e a mitigação de impactos ambientais. Assim, a gestão da manutenção é indispensável, pois se tornou um diferencial competitivo fazendo parte da estratégia de negócio de empresas.

4.1 HISTÓRIA DA MANUTENÇÃO

A história da manutenção pode ser dividida em quatro gerações, cada etapa de modernização, que acompanha e reflete mudanças tecnológicas e operacionais nas indústrias, conforme divisão ilustrada na figura 8.

Figura 8. Evolução da Manutenção

MANUTENÇÃO E FALHAS								
EVOLUÇÃO DA MANUTENÇÃO								
Ano	Primeira Geração		Segunda Geração		Terceira Geração		Quarta Geração	
								
	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010
Aumento das expectativas em relação à Manutenção	. Conserto após a falha		. Necessidade de disponibilidade crescente . Maior vida útil do equipamento		. Aumenta a disponibilidade . Melhor relação custo-benefício . Preservação do meio ambiente		. Maior disponibilidade e confiabilidade . Preservação do meio ambiente . Maior Segurança . Influência nos resultados e gerência dos ativos	
Visão quanto à falha do equipamento	. Todos os equipamentos se desgastam com a idade e, por isso, falham		. Todos os equipamentos se comportam de acordo com a curva da banheira		. O conceito de confiabilidade começa a ser aplicado - MCC (Manutenção Centrada na Confiabilidade)		. Consolidação da MCC e da Engenharia de Manutenção	
Mudança nas técnicas de Manutenção	. Habilidades voltadas para o reparo Manutenção Corretiva		. Planejamento manual da manutenção . Computadores grandes e lentos . Manutenção Preventiva (por tempo)		. Monitoramento da condição. Manutenção Preditiva . Análise de risco . Computadores pequenos e rápidos . Softwares potentes . Grupos de trabalho multidisciplinares . Projetos voltados para confiabilidade . Contratação por mão de obra e serviços		. Maior confiabilidade . Maior disponibilidade . Preservação do meio ambiente . Segurança . Influir nos resultados . Gerenciar os ativos	

Fonte: (KARDEC; NASCIF, 2009)

A primeira geração, antes da Segunda Guerra Mundial, foi caracterizada pela predominância da manutenção corretiva, onde a ocorrência da falha era imprevisível e não planejada. Nesse período, os equipamentos eram mais simples, robustos e com baixa mecanização, o que evidencia que eram projetados para suportar as falhas, considerando a manutenção uma atividade com ação após a ocorrência, sem ser considerada uma prioridade nos processos operacionais, de

acordo com KARDEC e NASCIF (2009) a manutenção era uma atividade menos crítica e estruturada. A aplicação corretiva se tornava suficiente, devido à forma que os equipamentos eram projetados, permitido muitas vezes continuar a operação mesmo após ter falhado. Assim, a manutenção era vista apenas como uma medida paliativa, não relacionada ao custo e sem grande impacto estratégico para as empresas.

Na segunda geração, que ocorreu entre 1950 e 1970, o crescimento da mecanização e a maior influência da tecnologia nas instalações industriais impulsionaram mudanças significativas na manutenção. Surgiu o conceito de manutenção preventiva, que é baseada em intervenções periódicas para evitar falhas e aumentar a vida útil dos equipamentos (KARDEC e NASCIF, 2009). Esse tipo de manutenção, se tornou relevante em conjunto com os sistemas de planejamento e controle da manutenção, que buscam organizar as atividades que devem ser realizadas com o objetivo de minimizar o acontecimento de falhas. Para transformadores e outros equipamentos complexos, essa evolução foi importante para atender à crescente demanda por confiabilidade e eficiência operacional. Desde então, a manutenção começou a ser reconhecida como um fator estratégico para reduzir custos operacionais e aumentar a disponibilidade dos sistemas.

A terceira geração, foi iniciada na década de 1970, gerando um marco significativo, trazendo a manutenção planejada. Surgindo nesse período, a manutenção preditiva que ganhou destaque, pois permitia o monitoramento do desempenho dos equipamentos por meio de técnicas avançadas, como análise de vibração e termografia (KARDEC e NASCIF, 2009). Além disso, o uso de softwares possibilitou maior precisão no planejamento e acompanhamento das atividades, estatística e probabilidade promovendo uma gestão mais minuciosa em falhas ocultas e com o histórico de ocorrência. A confiabilidade passou a ser um conceito central, com a introdução da Manutenção Centrada em Confiabilidade (RCM) com diferentes metodologias sistemáticas e estruturadas aplicadas em diversas indústrias, sendo essencial a presença de um time multifuncional para maior alinhamento estratégico, finalizando como a quarta geração.

4.2 TIPOS DE MANUTENÇÃO

Atualmente são definidos tipos básicos de manutenção conforme Kardec e

Nascif (2009), que são abordados na sequência:

- **Manutenção Corretiva:** é a ação realizada para correção de falha, após o evento, tendo como objetivo principal corrigir ou restaurar e retornar ao funcionamento. Segundo Kardec e Nascif (2009), essa abordagem pode ser dividida em duas categorias: corretiva não-planejada, onde é um acontecimento de maneira emergencial o que resulta em custos elevados, impactos no processo produtivo e interrupção forçada e a corretiva planejada, se baseia em análises prévias que identificam a necessidade da intervenção em períodos planejados, o que causa redução de custos e impactos operacionais. Conforme Xenos (1998), é essencial que mesmo as intervenções corretivas sejam acompanhadas de uma análise das causas fundamentais das falhas, visando evitar sua reincidência. Embora ainda amplamente utilizada em situações emergenciais, a manutenção corretiva não deve ser a única abordagem empregada, uma vez que pode comprometer a confiabilidade do equipamento e aumentar significativamente os custos operacionais e influenciar na vida útil a longo prazo.
- **Manutenção Preventiva:** é atuação de atividades previamente planejadas com o objetivo de antecipar e evitar as falhas, programadas para ser realizadas em intervalos regulares. De acordo com Kardec e Nascif (2009), nessa abordagem é imprescindível a elaboração de um plano de manutenção com ações recomendadas para a segurança e a continuidade operacional prioritárias. Xenos (1998) destaca que, embora a manutenção preventiva demande um planejamento rigoroso, envolvendo cada componente presente no equipamento, ela reduz significativamente a frequência de falhas e aumenta a disponibilidade dos equipamentos. Essa abordagem também permite que as intervenções sejam realizadas em condições controladas, minimizando interrupções inesperadas na produção.
- **Manutenção Preditiva:** esse tipo de manutenção pode ser considerado sistemático, pois segue estrategicamente uma lógica de parâmetros e técnicas para monitoramento das condições de funcionamento e ações de correção que são identificadas, com o objetivo de definir o melhor instante para a intervenção, com o máximo aproveitamento do ativo (OTANI e MACHADO, 2008 apud COSTA, 2013). A maior vantagem da manutenção

preditiva com relação às outras, é pelo fato da previsão de falhas com maior antecedência, melhoria das condições de operação dos equipamentos, entre outros (MIRSHAWKA, 1991 apud REIS et al.2010).

- **Manutenção Centrada em Confiabilidade (MCC):** essa atuação busca otimizar os processos de manutenção, focando na confiabilidade dos equipamentos e sistemas. Segundo Kardec e Nascif (2009), a MCC ou RCM, através de metodologias atribui detalhadamente uma investigação em cada componente dos equipamentos, analisando seus modos de falha e definido formas de preveni-las ou minimizar suas consequências. Essa abordagem tem como base perguntas estruturadas que orientam as decisões sobre manutenção, abordando funções, causas e impactos das falhas. Os resultados incluem maior conhecimento técnico, trabalho colaborativo, identificação de falhas potenciais e desenvolvimento de planos de manutenção eficazes, otimizando as tarefas a ser executadas e diminuindo custos.

4.3 FMEA (*FAILURE MODES AND EFFECTS ANALYZIS*)

A metodologia originada na MCC, Análise de Modos e Efeitos de Falhas (FMEA) é uma das técnicas utilizadas para prevenção com a investigação e identificação de potenciais falhas em componentes de um equipamento ou sistema. Segundo Sobral e Abreu (2013), a FMEA segue a premissa que analisar os modos de falha de cada componente, suas causas e os efeitos pode ser gerada uma tomada de decisões que irão prevenir a falha e avaliar os riscos, antes do equipamento começar a dar indícios de uma operação anormal. Essa análise fornece informações para a implementação de ações recomendadas, contribuindo para o aumento da confiabilidade, disponibilidade e qualidade de produtos ou serviços (Stamatis, 2003).

Para compreender essa metodologia, é preciso definir os conceitos empregados, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2. Conceitos Básicos FMEA

Conceito	Definição
Função	item ou sistema faça dentro de um padrão de desempenho especificado, com sua finalidade ou objetivo.
Falha	Término da capacidade de um item desempenhar a função requerida (NBR 5462: 1994).
Modo de Falha	Condições ou evento que proporcionam uma falha funcional (SAE JA1011); ou possíveis estados de falha de um item, para determinada função (IEC 60300-3-11).
Causa de Falha	Meio pelo qual um equipamento, subsistema, sistema, resulta num modo de falha (SOARES, 2014); ou circunstâncias relativas ao projeto, fabricação ou uso que conduzem a uma falha (NBR 5462: 1994).
Efeito de Falha	Acontece quando um modo de falha ocorre. Esta definição evidencia a finalidade do estudo dos efeitos das falhas: pesquisar os impactos dos modos de falha nas funções e definir as consequências da falha.
Severidade	Gravidade da falha, associada ao impacto negativo dos possíveis danos ambientais, pessoais e operacionais. Quão severo é o impacto do efeito no equipamento (SIQUEIRA, 2005).
Ocorrência	Probabilidade de acontecer a falha (SOARES, 2014).
Detecção	Probabilidade envolvida na percepção da falha ou de seus efeitos. Quão difícil é a detecção do modo de falha (SIQUEIRA, 2005; SOARES, 2014).

Fonte: Próprio Autor.

Segundo Toledo e Amaral (2006), a ferramenta FMEA pode oferecer diversas vantagens:

- Possibilita a obtenção de um banco de dados/histórico sobre as falhas dos produtos e/ou processos;
- Melhor conhecimento sobre os problemas existentes, compreendendo a influência de cada componente no equipamento;
- As ações para desenvolvimento de melhorias no projeto;
- Controle e redução dos custos através do planejamento e da mitigação de ocorrência de falhas;
- Lista de classificação de modos de falhas potenciais, estabelecendo um sistema de priorização para considerações de ações recomendadas;

Segundo Blischke e Murthy (2000), FMEA é um procedimento importante para identificar e avaliar as consequências ou riscos associados com os potenciais modos de falha, sendo uma análise qualitativa que normalmente inclui uma lista de modos de falha, possíveis causas para cada falha, os efeitos da falha e sua gravidade e ações corretivas que possam ser tomadas, sendo sua principal vantagem oferecer confiabilidade ao equipamento.

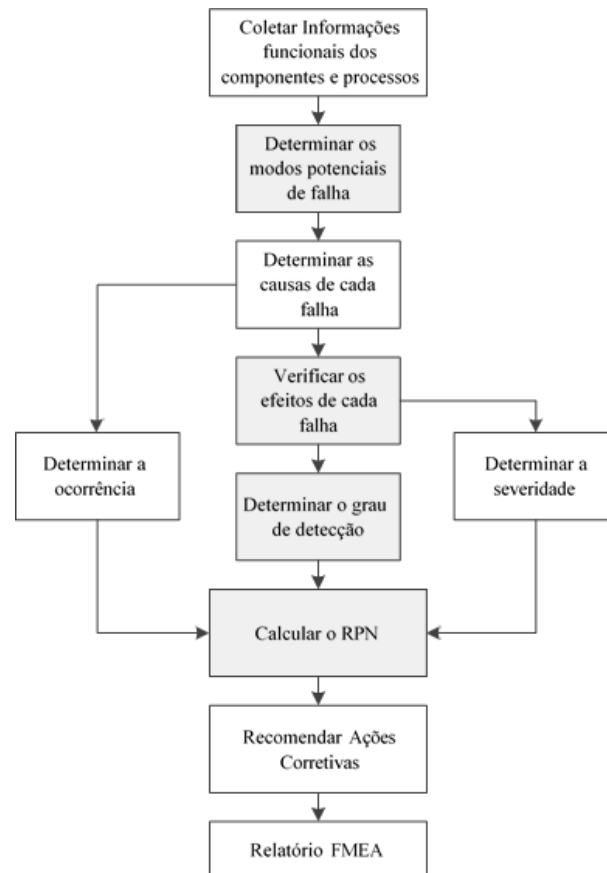
Todas essas informações coletadas são melhor analisadas quando disposta em forma de tabela (formulário), como mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Formulário de Registro do FMEA

MCC	Planilha de Análise de Modos e Efeitos de Falha														
	Sistema			Sistema Nº		Equipe				Folha		Data			
ID	Componente	Função	Modo de Falha	Causa da Falha	Efeito da Falha	Ação Preventiv a	Identificação do Risco				Comentários	Revisão do Risco			
							O	S	D	RPN		O	S	D	RPN

Fonte: Adaptado (AKBARI et al., 2013)

Para se conduzir uma FMEA eficientemente e preencher o formulário, recomenda-se seguir passos sistemáticos, como mostrado na Figura 9: - definir a finalidade ou as expectativas da avaliação, fazer um diagrama de blocos funcionais ou um fluxograma de processo, dar prioridades, coletar dados, analisar, apresentar resultados, confirmar e avaliar os resultados e realizar tudo novamente (STAMATIS, 1995).

Figura 9. Procedimento Sistemático Geral do FMEA

Fonte: Adaptado de (TENG; HO, 1996)

4.3.1 AVALIAÇÃO DE RISCO

Os três elementos que ajudam a definir a priorização das falhas são a ocorrência, a severidade e a detecção. A ocorrência é a frequência com que a falha ocorre, a severidade é o efeito da falha, e a detecção corresponde à habilidade de detectar a falha antes de sua ocorrência (STAMATIS, 1995).

Há muitas formas de definir o valor desses componentes. O mais usual é a utilização de escalas numéricas. Essas escalas podem ter qualquer valor, não há um padrão especificado para elas. Entretanto, atualmente, há duas escalas amplamente utilizadas nas empresas, que são: a escala de 1 a 5 e a escala de 1 a 10. A primeira é limitada por natureza, mas oferece uma fácil interpretação. A segunda é amplamente utilizada e fortemente recomendada porque prevê fácil interpretação, exatidão e precisão na qualificação da escala (STAMATIS, 1995).

O valor *RPN* deve ser utilizado apenas para classificar a prioridade das falhas no sistema, conforme equação 2.

$$RPN_{\text{crítico}} = (S \times O \times D) \quad (2)$$

- RPN – *Risk Priority Number*
- S – Severidade
- O – Ocorrência
- D – Detecção

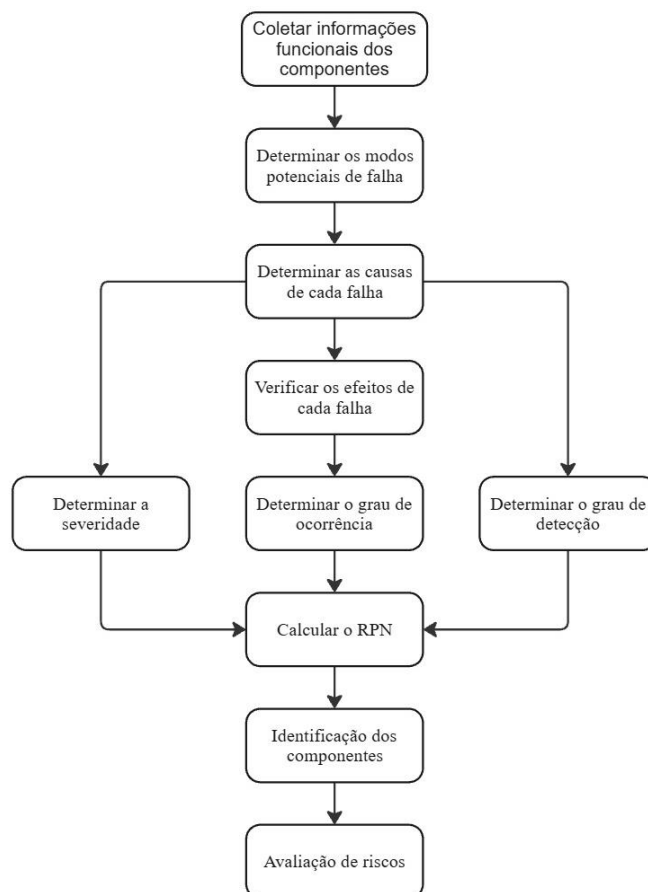
Dessa forma, com os valores do *RPN* de cada componente, é criado estrategicamente um plano de ações recomendadas para priorizar os componentes mais críticos, antes mesmo de ocorrer a incidência.

5. METODOLOGIA

A metodologia FMEA e sua aplicação, consiste na identificação dos componentes do equipamento para realizar o levantamento das suas funções, dos tipos de falha em potencial, das causas e dos efeitos da falha. Com a aplicação desse método é possível desenvolver uma ferramenta de uso da FMEA a fim de avaliar o risco de falha de transformadores de potência e viabilizar a otimização de um cronograma de manutenção para determinação da confiabilidade do equipamento.

O processo de levantamento e desenvolvimento do FMEA, é dividido em fases, conforme mostrado na Figura 10.

Figura 10. Processo de Desenvolvimento do FMEA



Fonte: Próprio Autor.

5.1 FMEA APLICADA AOS COMPONENTES

Para o desenvolvimento da ferramenta, identificou-se os componentes que compõe um transformador de potência e se realizou uma análise funcional, ou seja, a descrição da função de cada componente. Depois, passou-se para a etapa de levantamento dos modos de falhas, a partir do entendimento de como cada função pode chegar a falhar. Dada a complexidade dos mecanismos de falhas em um transformador, o estudo foi feito apenas para os componentes de forma geral. A escolha é justificada sobre aqueles componentes que mais contribuem para falhas em um transformador.

Em seguida, levando em consideração que um modo de falha potencial pode ter origem em várias causas, foram identificadas e descritas as causas independentes e mais prováveis para cada modo de falha identificado. Finalmente, foi listado o efeito de cada modo de falha na confiabilidade no equipamento.

Para a realização destas etapas, foram consultados manuais e normas técnicas (ABNT/NBR, CIGRÉ, IEC, ISO, SAE), tese de doutorado, dissertações de mestrado e publicações desenvolvidas no âmbito do Programa de P&D da ANEEL.

5.1.1 CONHECIMENTO DOS COMPONENTES E ANÁLISE FUNCIONAL

Para conhecimento do funcionamento de cada componente, é importante indicar a condição de operação normal. Sendo assim, as funções para cada componente que compõem um transformador são os dados de entrada para início da análise, conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Análise Funcional dos Componentes

ID	Sistema do Transformador	Componente	Função
1	Parte Ativa	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.
2		Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.
3		Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em

			carga.
4	Sistema de Isolamento	Papel Isolante	Realizar a isolação elétrica entre as fases, parte ativa e as saídas além de auxiliar na dissipação do calor; sustentar os enrolamentos gerando estrutura mecânica e apoio para a prensagem da parte ativa.
5		Óleo Isolante	Realizar a isolação da parte ativa (alta rigidez dielétrica), refrigeração (baixa viscosidade) e proteção dos isolantes sólidos.
6	Sistema de Resfriamento	Radiador	Fazer circulação do óleo isolante para redução de temperatura realizado a dissipação de calor.
7		Ventiladores	Auxiliar na dissipação de calor, aumentando a eficiência térmica.
8	Controle e Proteção	Relé de Gás (Buchholz)	Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo; detectar a perda de óleo e o deslocamento súbito de óleo para o conservador.
9		Indicador de Nível do Óleo	Detectar quando o volume do óleo do transformador estiver baixo e vazamentos.
10		Válvula de Alívio	Aliviar a pressão excessiva gerada entre gás e óleo quando se expandem de forma súbita.
11		Secador de Ar	Remover a umidade do transformador
12	Tanque	Tanque	Envolver o óleo e proteger a parte ativa
13		Conservador	Reservatório para expansão do óleo do transformador.
14		Bolsa de Borracha	Permite as variações do volume do óleo, assim protegendo o óleo de qualquer tipo de contaminação
15	Acessórios	Buchas	Isolar e permitir a passagem dos condutores

Fonte: Próprio Autor.

5.1.2 DETERMINAÇÃO DOS MODOS DE FALHA

Os modos de falha de acordo com os dados históricos encontrados como resultado de pesquisas bibliográficas e informações industriais para cada componente dos sistemas do transformador são apresentados na Tabela 5, que retrata os sistemas, componentes, função e seus modos de falha em cada componente do transformador de potência.

Tabela 5. Análise dos Modos de Falha

ID	Sistemas	Componente	Função	Modos de Falha
1	Parte Ativa	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;

2		Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;
3		Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;
4	Sistema de Isolamento	Papel Isolante	Realizar a isolação elétrica entre as fases, parte ativa e as saídas além de auxiliar na dissipação do calor; sustentar os enrolamentos gerando estrutura mecânica e apoio para a prensagem da parte ativa.	Queima, ressecamento e degradação do papel; Falha na resistência dielétrica;
5		Óleo Isolante	Realizar a isolação da parte ativa (alta rigidez dielétrica), refrigeração (baixa viscosidade) e proteção dos isolantes sólidos.	Contaminação do óleo com partículas, umidade e ar; Vazamento de óleo;
6	Sistema de Resfriamento	Radiador	Fazer circulação do óleo isolante para redução de temperatura realizado a dissipação de calor.	Vazamento de óleo; Falha na circulação de ar;
7		Ventiladores	Auxiliar na dissipação de calor, aumentando a eficiência térmica.	Falha no motor e ligações; Falha na circulação de r;
8	Controle e Proteção	Relé de Gás (Buchholz)	Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo; detectar a perda de óleo e o deslocamento súbito de óleo para o conservador.	Não atuar na coleta de gases; Não detectar a perda de óleo com a baixa pressão; Atuação indevida;
9		Indicador de Nível do Óleo	Detectar quando o volume do óleo do transformador estiver baixo e vazamentos.	Falha no sensor de nível, falha de sinal de alarme;
10		Válvula de Alívio	Aliviar a pressão excessiva gerada entre gás e óleo quando se expandem de forma súbita.	Atuação indevida devido outros problemas internos; Falha na vedação;
11		Secador de Ar	Remover a umidade do transformador.	Saturação da sílica e gel; Falha da absorção de umidade;
12	Tanque	Tanque	Envolver o óleo e proteger a parte ativa.	Vazamento; Corrosão e oxidação;
13		Conservador	Reservatório para expansão do óleo do transformador.	Contaminação do óleo; Falha na vedação; Falha na estrutura de apoio;
14		Bolsa de Borracha	Permite as variações do volume do óleo, assim protegendo o óleo de qualquer tipo de contaminação.	Rachadura ou desgaste;
15	Acessórios	Buchas	Isolar e permitir a passagem dos condutores.	Trincas; Falha na vedação; Falha no isolamento;

Fonte: Próprio Autor.

5.1.3 LEVANTAMENTO DAS CAUSA DE FALHA

As causas de maior probabilidade para cada modo de falha, apontados para os componentes do transformador, são mostradas na Tabela 6, que retrata os sistemas, componentes, função, modos de falha e suas causas em cada componente analisado.

Tabela 6. Análise das Causas de Falha

ID	Sistemas	Componente	Função	Modos de Falha	Causa da Falha
1	Parte Ativa	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;	Falha de fabricação e projeto; Falha na refrigeração e circulação do óleo nos canais
2		Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;	Sobrecarga e esforço mecânico excessivo, falha de isolamento, curto-circuito gerado pelos gases, contaminação do óleo por partículas ou umidade; Geração excessiva de gases;
3		Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;	Desgastes dos contatos; Dano mecânicos na caixa de transmissão;
4	Sistema de Isolamento	Papel Isolante	Realizar a isolação elétrica entre as fases, parte ativa e as saídas além de auxiliar na dissipação do calor; sustentar os enrolamentos gerando estrutura mecânica e apoio para a prensagem da parte ativa.	Queima, ressecamento e degradação do papel; Falha na resistência dielétrica;	Deterioração do óleo isolante; Perda das propriedades dielétricas do papel;
5		Óleo Isolante	Realizar a isolação da parte ativa (alta rigidez dielétrica), refrigeração (baixa viscosidade) e proteção dos isolantes sólidos.	Contaminação do óleo com partículas, umidade e ar; Vazamento de óleo;	Excesso de umidade, gases e partículas; Baixa isolação com redução do volume do óleo;
6	Sistema de Resfriamento	Radiador	Fazer circulação do óleo isolante para redução de temperatura realizado a dissipação de calor.	Vazamento de óleo; Falha na circulação de ar;	Degradação das vedações; Circuitos das ligações danificados, Envelhecimento da carcaça; Sobrecarga;

7		Ventiladores	Auxiliar na dissipação de calor, aumentando a eficiência térmica.	Falha no motor e ligações; Falha na circulação de ar;	Danificação dos circuitos; Danos mecânicos; Sobrecarga;
8	Controle e Proteção	Relé de Gás (Buchholz)	Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo; detectar a perda de óleo e o deslocamento súbito de óleo para o conservador.	Não atuar na coleta de gases; Não detectar a perda de óleo com a baixa pressão; Atuação indevida;	Falha no sistema de preservação;
9		Indicador de Nível do Óleo	Detectar quando o volume do óleo do transformador estiver baixo e vazamentos.	Falha no sensor de nível, falha de sinal de alarme;	Perda de resfriamento e isolamento com o óleo abaixo do nível indicado.
10		Válvula de Alívio	Aliviar a pressão excessiva gerada entre gás e óleo quando se expandem de forma súbita.	Atuação indevida devido outros problemas internos; Falha na vedação;	Sobre pressão; Formação de gases dentro do transformador;
11		Secador de Ar	Remover a umidade do transformador.	Saturação da sílica e gel; Falha da absorção de umidade;	Falta de troca da sílica em gel
12	Tanque	Tanque	Envolver o óleo e proteger a parte ativa.	Vazamento; Corrosão e oxidação;	Manutenção insuficiente;
13		Conservador	Reservatório para expansão do óleo do transformador.	Contaminação do óleo; Falha na vedação; Falha na estrutura de apoio;	Ruptura da bolsa de borracha ou do suplemento do comutador; Manutenção insuficiente;
14		Bolsa de Borracha	Permite as variações do volume do óleo, assim protegendo o óleo de qualquer tipo de contaminação.	Rachadura ou desgaste;	Falta de troca/manutenção;
15	Acessórios	Buchas	Isolar e permitir a passagem dos condutores.	Trincas na porcelana; Falha na vedação; Falha no isolamento;	Perda das propriedades dielétricas; Falta de limpeza e manutenção da porcelana;

Fonte: Próprio autor.

5.1.4 VERIFICAÇÃO DOS EFEITOS DE FALHA

O efeito é relacionado a falha, como pode ser observado na Tabela 7, que retrata os sistemas, componentes, função, modos de falha e suas causas, como os efeitos da falha de cada componente do transformador de potência.

Tabela 7. Análise dos Efeitos de Falha

ID	Sistemas	Componente	Função	Modos de Falha	Causa da Falha	Efeitos da Falha
1	Parte Ativa	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;	Falha de fabricação e projeto; Falha na refrigeração e circulação do óleo nos canais	Descarga parcial e perdas dielétricas; Aumento da temperatura; Perda de eficiência; Vibração e som excessivo;
2		Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;	Sobrecarga e esforço mecânico excessivo, falha de isolamento, curto-circuito gerado pelos gases, contaminação do óleo por partículas ou umidade; Geração excessiva de gases;	Deformação do enrolamento (degradação das espiras).; Geração de arco; Queima do papel isolante;
3		Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;	Desgastes dos contatos; Dano mecânicos na caixa de transmissão;	Redução da superfície de contato, erosão dos contatos e formação de material carbonizado;
4	Sistema de Isolamento	Papel Isolante	Realizar a isolação elétrica entre as fases, parte ativa e as saídas além de auxiliar na dissipação do calor; sustentar os enrolamentos gerando estrutura mecânica e apoio para a prensagem da parte ativa.	Queima, ressecamento e degradação do papel; Falha na resistência dielétrica;	Deterioração do óleo isolante; Perda das propriedades dielétricas do papel;	Reduzir a resistência dielétrica e mecânica do papel;
5		Óleo Isolante	Realizar a isolação da parte ativa (alta rigidez dielétrica), refrigeração (baixa viscosidade) e proteção dos isolantes sólidos.	Contaminação do óleo com partículas, umidade e ar; Vazamento de óleo;	Excesso de umidade, gases e partículas; Baixa isolação com redução do volume do óleo;	Aumento da perda dielétrica do óleo; Sobreaquecimento e curto circuito no transformador;
6	Sistema de Resfriamento	Radiador	Fazer circulação do óleo isolante para redução de temperatura realizado a dissipação de calor.	Vazamento de óleo; Falha na circulação de ar;	Degradação das vedações; Circuitos das ligações danificados, Envelhecimento da	Aumento da temperatura; Sobrecarga; Queima do transformador;

					carcaça; Sobrecarga;	
7		Ventiladores	Auxiliar na dissipação de calor, aumentando a eficiência térmica.	Falha no motor e ligações; Falha na circulação de r;	Danificação dos circuitos; Danos mecânicos; Sobrecarga;	Aumento da temperatura;
8	Controle e Proteção	Relé de Gás (Buchholz)	Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo; detectar a perda de óleo e o deslocamento súbito de óleo para o conservador.	Não atuar na coleta de gases; Não detectar a perda de óleo com a baixa pressão; Atuação indevida;	Falha no sistema de preservação;	Operação incorreta;
9		Indicador de Nível do Óleo	Detectar quando o volume do óleo do transformador estiver baixo e vazamentos.	Falha no sensor de nível, falha de sinal de alarme;	Perda de resfriamento e isolamento com o óleo abaixo do nível indicado.	Operação incorreta;
10		Válvula de Alívio	Aliviar a pressão excessiva gerada entre gás e óleo quando se expandem de forma súbita.	Atuação indevida devido outros problemas internos; Falha na vedação;	Sobre pressão; Formação de gases dentro do transformador;	Explosão do transformador;
11		Secador de Ar	Remover a umidade do transformador.	Falha da absorção de umidade;	Falta de troca da sílica em gel	Saturação da sílica e gel;
12	Tanque	Tanque	Envolver o óleo e proteger a parte ativa.	Ambiente externo; Degradação da estrutura;	Manutenção insuficiente;	Vazamento e fissuras; Corrosão e oxidação; Descamação da tinta
13		Conservador	Reservatório para expansão do óleo do transformador.	Falha na vedação; Falha na estrutura de apoio;	Ruptura da bolsa de borracha ou do suplemento do comutador; Manutenção insuficiente;	Contaminação do óleo;
14		Bolsa de Borracha	Permite as variações do volume do óleo, assim protegendo o óleo de qualquer tipo de contaminação.	Rachadura ou desgaste;	Falta de troca/manutenção;	Contaminação do óleo do conservador;
15	Acessórios	Buchas	Isolar e permitir a passagem dos condutores.	Trincas; Falha na vedação; Falha no isolamento;	Perda das propriedades dielétricas; Falta de limpeza e manutenção da porcelana;	Contaminação externa, corrosão, corrente de descarga, explosões e falta de segurança.

Fonte: Próprio autor.

5.1.5 DETERMINAÇÃO DO ÍNDICE DE OCORRÊNCIA, SEVERIDADE E DETECÇÃO

Para determinar os índices de ocorrência, severidade e detecção, deve-se analisar o histórico de falhas e compartilhar conhecimento com especialistas e o time multifuncional para especificar os motivos pelos quais os componentes podem falhar, vale destacar a importância de ser feito o registro das falhas para consulta no futuro.

Como se tem associado com as causas de falha a probabilidade de ocorrência destas, nesse momento deve ser atribuído esse índice. Dados de fabricação de certos componentes podem também ser utilizados com o intuito de complementar (e, até mesmo confirmar) as informações obtidas. Na tabela 8 tem-se os parâmetros para avaliação do índice Ocorrência, utilizado no presente trabalho.

Tabela 8. Classificação Nível de Ocorrência de Risco

OCORRÊNCIA		DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
I	Improvável	Falha praticamente não ocorrerá	0-1
II	Pouco provável	Falha ocorrerá excepcionalmente	2-3-4
III	Casual	Falha razoavelmente esperada	5-6-7
IV	Provável	Falha ocorrerá ocasionalmente	8-9
V	Frequente	Falha ocorrerá com frequência	10

Fonte: Adaptado de Moura (2000) e Siqueira (2005).

Os efeitos gerados em cada modo de falha podem ser classificados segundo seus níveis de impacto gerado no equipamento (severidade). A severidade é determinada tendo como referência o risco, ou mesmo em razão da decorrência da falha. A tabela 9 apresenta os parâmetros utilizados para avaliação do índice Severidade no presente trabalho.

Tabela 9. Classificação do Nível de Severidade

SEVERIDADE		DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
I	Insignificante	Falha praticamente não provoca dano	0-1
II	Mínima	Falha provoca alguns danos de menor intensidade	2-3-4
III	Moderado	Danos significativos	5-6-7
IV	Crítico	Alta taxa de falha causando perda ao sistema	8-9
V	Catastrófico	Danos extremos que afetam todo o sistema	10

Fonte: Adaptado de Moura (2000) e Siqueira (2005).

Os métodos de detecção das falhas correspondem aos procedimentos, testes e/ou análises utilizadas com o intuito de identificar as falhas, e então são definidos índices correspondentes. Portanto, o índice de detecção é utilizado para se quantificar o risco de que uma determinada causa de falha não seja detectada antes de sua ocorrência. A tabela 10 apresenta os parâmetros utilizados para avaliação do índice detecção no presente trabalho.

Tabela 10. Classificação do Nível de Detecção

DETECÇÃO	DESCRIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
I	Fácil	Falha detectável por procedimento operacional
II	Razoável	Falha detectável por inspeção operacional
III	Difícil	Falha detectável por ensaio funcional
IV	Muito difícil	Falha detectável apenas por desligamento
V	Impossível	Falha totalmente oculta

Fonte: Adaptado de Moura (2000) e Siqueira (2005).

5.1.6 CÁLCULO RPN (RISK PRIORITY NUMBER)

A determinação do RPN representa a etapa quantitativa do método. em por objetivo ajudar no processo de decisão sobre a prioridade de tratar os diversos modos de falha presentes no sistema. Seu cálculo é realizado, tradicionalmente, através do produto entre os três índices atribuídos anteriormente (Severidade, Ocorrência e Detecção), conforme a Equação 2. A figura 11, ilustra o cálculo do RPN no formulário do FMEA, que se encontra completo no apêndice A.

Figura 11. Cálculo do RPN

Sistema: Transformador			FMEA		Responsável:						
			(x) MANUTENÇÃO () OPERAÇÃO () SISTEMAS			Data:					
Nº	ITEM	COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHAS POSSÍVEIS			ÍNDICES				
				MODO	EFEITO	CAUSAS	S	O	D	RPN	
1	Parte Ativa	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;	Descarga parcial e perdas dielétricas; Aumento da temperatura; Perda de eficiência; Vibração e som excessivo;	Falha de fabricação e projeto; Falha na refrigeração e circulação do óleo nos canais	8	2	8	128	
2		Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;	Deformação do enrolamento (degradação das espiras); Geração de arco; Queima do papel isolante;	Sobrecarga e esforço mecânico excessivo, falha de isolamento, curto-circuito gerado pelos gases, contaminação do óleo por partículas ou umidade; Geração excessiva de gases;	9	2	7	126	
3		Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;	Redução da superfície de contato, erosão dos contatos e formação de material carbonizado	Desgastes dos contatos; Dano mecânicos na caixa de transmissão;	7	7	3	147	

Fonte: Próprio autor.

Com o intuito de definir os componentes que requerem planos de ações (itens críticos), foram adotados critérios que buscam analisar os componentes com expressivo valor de risco calculado, assim como as falhas com elevados índices de severidade, de probabilidades de ocorrência e com menores probabilidades de detecção, resultando em uma avaliação de risco.

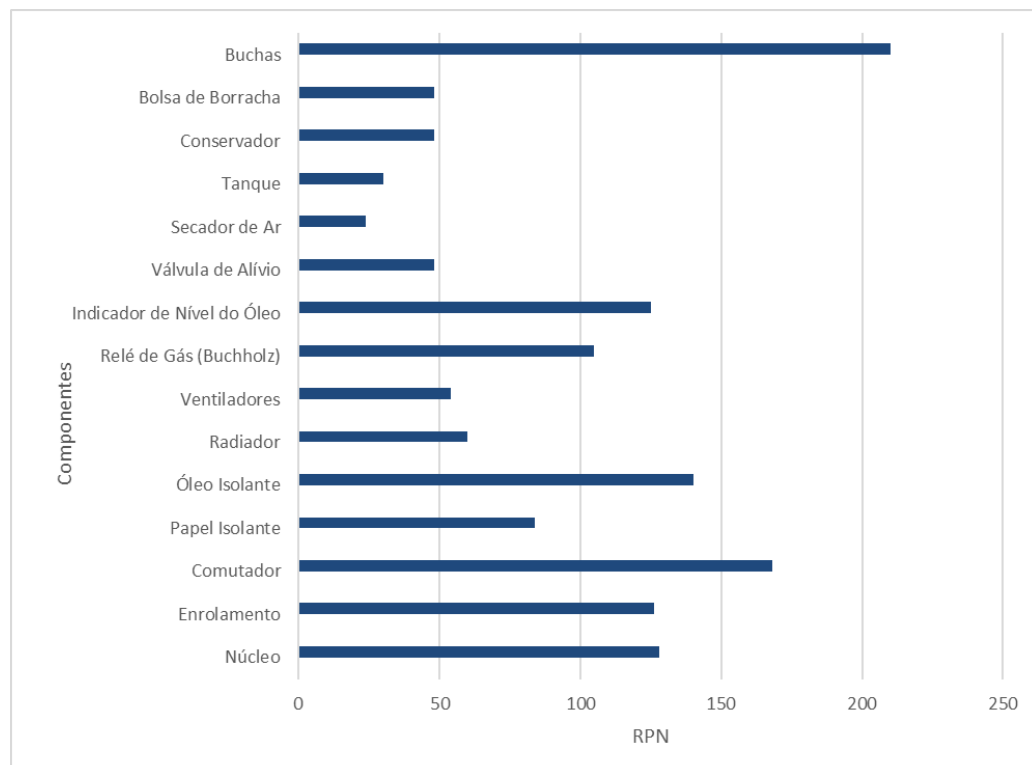
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa etapa, avaliam-se os componentes e equipamentos críticos obtidos pela análise FMEA. Essa tem o objetivo de estabelecer um método padronizado para determinação de risco baseado na análise dos componentes críticos para o equipamento; a partir daí, através de melhorias se gerar alternativas para a engenharia de manutenção realizar ações efetivas, priorizando esses componentes, buscando diminuir a incidências de falhas ou a sua severidade.

6.1 IDENTIFICAÇÃO DOS COMPONENTES CRÍTICOS

A figura 12 apresenta todos os componentes do transformador de potência, assim é possível visualizar os componentes que são mais críticos para o equipamento, sendo considerados prioritários para o funcionamento e segurança do transformador, sendo que a tabela completa como já enfatizado, pode ser encontrada no Apêndice A. A Figura 12, portanto, apresenta uma síntese da tabela completa, apresentando os componentes com seu respectivo *RPN* encontrados pela análise FMEA.

Figura 12. Análise do RPN dos Componentes



Fonte: Próprio autor.

As figuras 13 e 14, ilustram o impacto que pode causar uma falha no transformador, especialmente no componente de buchas, que é um acessório de um transformador de potência; entretanto, como na prática, esse componente mostrou-se sensível no emprego da metodologia FMEA, implicando no maior *RPN* observado da análise.

Figura 13. Quebra da Porcelana da Bucha



Fonte: BECHARA, R (2010).

Figura 14. Danos Gerados por Curto-Circuito na Bucha



Fonte: BECHARA, R (2010).

Além disso, como resultado do presente trabalho é apresentado um plano de manutenção, seguindo as ações recomendadas, como ilustrado pela figura 15, principalmente, nos componentes que apresentam maior *RPN* como por exemplo as buchas, comutador, núcleo, indicador de nível de óleo e enrolamento, que podem resultar em eventos catastróficos como explosão e incêndio, portanto, podem gerar danos que claramente comprometem a recuperação do equipamento.

Figura 15. Aplicação das Ações Recomendadas

Nº	COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHAS POSSÍVEIS			ÍNDICES				AÇÕES RECOMENDADAS
			MODO	EFEITO	CAUSAS	S	O	D	RPN	
1	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;	Descarga parcial e perdas dielétricas; Aumento da temperatura; Perda de eficiência; Vibração e som excessivo;	Falha de fabricação e projeto; Falha na refrigeração e circulação do óleo nos canais	8	2	8	128	Reparar; Prensagem do núcleo; Ensaio de corrente de excitação;
2	Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferente níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;	Deformação do enrolamento (degradação das espiras).; Geração de arco; Queima do papel isolante; Reatância de fuga;	Sobrecarga e esforço mecânico excessivo, falha de isolamento, curto-circuito gerado pelos gases, contaminação do óleo por partículas ou umidade; Geração excessiva de gases;	9	2	7	126	Construção de novo enrolamento para substituição; Ensaio elétricos em geral; Análise do óleo;
3	Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;	Redução da superfície de contato, erosão dos contatos e formação de material carbonizado	Desgastes dos contatos; Dano mecânicos na caixa de transmissão;	8	7	3	168	Substituição dos contatos; Lubrificação caixa de transmissão; Análise de número de posições;

Fonte: Próprio autor.

As ações recomendadas são atividades preventivas para mitigar a ocorrência das falhas, e analisando a consequência que pode resultar. Isso permite realizar uma intervenção planejada, com a programação da equipe que irá realizar a execução da atividade e os investimentos que serão aplicados, sendo assim criando o diferencial que é a estratégia.

7. CONCLUSÕES

O transformador de potência é o equipamento mais importante do sistema elétrico, sendo responsável pelo ajuste de níveis de tensão com a conversão de energia para adequação ao consumo. A sua complexidade, devido à construção e tecnologia robusta aplicada, aumenta a atenção com o equipamento, pois sua perda pode gerar problemas operacionais, impacto no funcionamento do sistema elétrico, além de custos elevados para substituição e reparos.

No cenário atual, a situação é ainda mais crítica, já que grande parte dos transformadores em operação se encontram próximo do fim de sua vida útil, aumentando a probabilidade de falhas. Diante desse cenário, a metodologia *Failure Modes and Effects Analysis* (FMEA), como analisada no presente trabalho, mostra-se como uma ferramenta importante a ser utilizada na avaliação e gerenciamento de riscos associados a falhas em transformadores. Essa abordagem se destaca por possibilitar a priorização dos equipamentos críticos por meio do cálculo do *Risk Priority Number* (RPN), permitindo maior assertividade nos investimentos em manutenção preventiva e corretiva.

O trabalho alcançou seus objetivos apresentando uma ordem de prioridade dos componentes do transformador através do indicador RPN da técnica FMEA, proporcionando uma análise do grau de importância deste equipamento para o sistema. Os resultados obtidos apresentam uma análise do RPN dos componentes de um transformador de potência, que geraria maior risco para o equipamento essencialmente pelo alto grau de ocorrência e severidade que suas falhas apresentam, que ocasionaria em eventos catastróficos como incêndio ou explosão, resultando na perda total do equipamento. Com análise pode-se observar que a bucha, sistema de proteção e controle (relé de gás e indicador de nível de óleo), sistema isolante (óleo isolante), comutador, enrolamento deve ser priorizados, devido a combinação dos índices de severidade, ocorrência e detecção.

Os procedimentos de manutenção, devem ser personalizados para cada componente devido às diferenças nos valores dos índices, por exemplo: enrolamento e núcleo, a ocorrência é baixa, porém a detecção é alta, pois a inspeção é realizada de forma mais invasiva, sendo necessário o desligamento do equipamento e como é onde se concentra a tecnologia do transformador, a severidade é alta devido ao impacto operacional e financeiro que uma falha pode

causar. Portanto, com o plano de manutenção, torna-se mais eficaz, objetivando uma redução do número de interrupções por falha no transformador de potência.

7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizado teve como base dados predominantemente qualitativos, devido à lacuna de informações existentes em documentação técnica, dissertação e normas técnicas.

Assim, sugere-se como trabalhos futuros que o procedimento utilizado seja repetido continuamente com os dados que vão sendo atualizados pelos relatórios de falha em transformadores a fim de verificar a validade do procedimento e mantê-lo atual. Entre as propostas destaca-se:

- Realizar uma matriz de risco relacionado com o impacto econômico para funcionalidade de analisar as condições técnicas operacionais e financeiras.
- Aplicar a teoria da curva da banheira em transformadores de potência para acompanhamento da vida útil do ativo.
- Relacionar a distribuição de Weibull com a utilização de dados quantitativos para prever as taxas falhas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT NBR 5462. Confiabilidade e manutenibilidade. **Associação Brasileira De Normas Técnicas**, n. 1, p. 37, 1994.
- AKBARI, M. et al. **Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Power Transformers**. Iran: 28 th International Power System Conference, 2013.
- BECHARA, R. Análise de falhas em transformadores de potência. 118 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- BLISCHKE, W.; MURTHY, D. **Reliability: modeling, prediction, and optimization**. Canada: John Wiley & Sons, 2000.
- CIGRE, W. G. A. 1. N. 227. Guidelines for Life Management Techniques for Power Transformers. n. June, 2002.
- CIGRÉ BRASIL, G. DE T. A. O. **Guia de Manutenção para Transformadores de Potência**, 2013.
- FRONTIN, S O. **Equipamentos de alta de tensão: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Brasília: Teixeira, 2013.
- IEC 60300-3-11. **Gestion de la sureté de fonctionnement – Partie 3-11. In: Guide d'application – maintenance basée sur la fiabilité**. Geneva: Commision Electrotechnique Internationale, 2010.
- KARDEC, A.; NASCIF, J. **Manutenção: Função Estratégica**. 3. ed. rev ed. Rio de Janeiro Qualitymark: Petrobras, 2009.
- LUZ, Maurício Valencia Ferreira da. **Noções básicas de transformadores de força e seus componentes**. Treinamento "In Company" para colaboradores da Siemens Transformadores. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica, 2014.
- MOURA, C. Análise de Modos e Efeitos de Falha Potencial (FMEA): manual de referência (SAE J-1739). São Paulo: IQA, 2000. Disponível em: Acesso em: 17 jan. 2025..
- MONCHY, François. **A Função Manutenção**. São Paulo: Durban, 1987.
- PALADY, P. FMEA: **análise dos modos de falha e efeitos**. 5. ed. São Paulo: IMAM. 1997.
- PENA, Miguel C. M. **Falhas em Transformadores de Potência: uma contribuição para análise, definições, causas e soluções**. 148 f. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

OTANI, Mario; MACHADO, Waltair Vieira. **A proposta de desenvolvimento de gestão da manutenção industrial na busca da excelência ou classe mundial.** Revista Gestão Industrial. UFAM: Manaus, 2008.

SAE INTERNACIONAL. **Evaluation Criteria for Reliability-Centered Maintenance (RCM) Processes:** SAE JA 1011. Warrendale, PA, 1999.

SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade - Manual de Implementação.** 1º Edição ed. Rio de Janeiro: Editora QualityMark, 2009.

SLACK, N.; BRANDON-JONES, A.; JOHNSTON R. **Administração da Produção.** 8ª Edição. Editora. Atlas, 2018. 5) TRABALHO, TECNOLOGIA E ORGANIZAÇÃO (TTO).

SOBRAL, J.; ABREU, A. **Manutenção Produtiva Total e Gestão Lean.** Lisboa: ISEL, 2013.

SOUZA, D. C. P. **Falhas e defeitos ocorridos em transformadores de potência do sistema elétrico da Celg, nos últimos 28 anos:** um estudo de caso Goiânia, 2008.

SOARES, T. M. C. Q. **Análise da eficácia da aplicação da metodologia FMEA do processo, caso de estudo numa empresa certificada.** 126 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Instituto Superior de Engenharia do Porto, 48 Porto, 2014.

STAMATIS, D. H. **Failure Mode and Effect Analysis FMEA from Theory to Execution.** Milwaukee: ASQC Quality Press, 2003.

TENG, S. (GARY); HO, S. (MICHAEL). Failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 5, p. 8–26, jul. 1996.

XENOS, Harilaus G. P.; **Gerenciando a Manutenção Produtiva.** Belo Horizonte, Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1998.

APÊNDICE A

Sistema: Transformador		FMEA		Responsável:						
		(x) MANUTENÇÃO () OPERAÇÃO () SISTEMAS		Data:						
Nº	COMPONENTE	FUNÇÃO	FALHAS POSSÍVEIS			ÍNDICES			RPN	AÇÕES RECOMENDADAS
			MODO	EFEITO	CAUSAS	S	O	D		
1	Núcleo	Proporcionar passagem para os caminhos do fluxo magnético gerado pela corrente que percorre os enrolamentos.	Saturação do núcleo; Aquecimento excessivo;	Descarga parcial e perdas dielétricas; Aumento da temperatura; Perda de eficiência; Vibração e som excessivo;	Falha de fabricação e projeto; Falha na refrigeração e circulação do óleo nos canais	8	2	8	128	Reparar; Prensagem do núcleo; Ensaio de corrente de excitação;
2	Enrolamento	Realizar a transferência e conversão de energia elétrica para diferentes níveis de tensão, transportando a corrente de carga.	Curto-circuito nos enrolamentos; Falha de isolamento; Degradação dos enrolamentos;	Deformação do enrolamento (degradação das espiras).; Geração de arco; Queima do papel isolante; Reatância de fuga;	Sobrecarga e esforço mecânico excessivo, falha de isolamento, curto-circuito gerado pelos gases, contaminação do óleo por partículas ou umidade; Geração excessiva de gases;	9	2	7	126	Construção de novo enrolamento para substituição; Ensaio elétricos em geral; Análise do óleo;
3	Comutador	Regular o nível de tensão nos enrolamentos, mudando as ligações das derivações de um enrolamento, utilizado em operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha da comutação; Falha nos contatos; Falha na isolação de roca dos contatos;	Redução da superfície de contato, erosão dos contatos e formação de material carbonizado	Desgastes dos contatos; Dano mecânicos na caixa de transmissão;	8	7	3	168	Substituição dos contatos; Lubrificação caixa de transmissão; Análise de número de posições;
4	Papel Isolante	Realizar a isolação elétrica entre as fases, parte ativa e as saídas além de auxiliar na dissipação do calor; sustentar os enrolamentos gerando estrutura mecânica e apoio para a prensagem da parte ativa.	Queima, ressecamento e degradação do papel; Falha na resistência dielétrica;	Reduzir a resistência dielétrica e mecânica do papel	Deteriorização do óleo isolante; Perda das propriedades dielétricas do papel;	7	4	3	84	Análise de gases dissolvidos; Análise físico-químico; Ensaio de Grau de polimerização; Processo de secagem da parte ativa;

5	Óleo Isolante	Realizar a isolamento da parte ativa (alta rigidez dielétrica), refrigeração (baixa viscosidade) e proteção dos isolantes sólidos.	Contaminação do óleo com partículas, umidade e ar; Vazamento de óleo;	Aumento da perda dielétrica do óleo; Sobreaquecimento e curto circuito no transformador;	Excesso de umidade, gases e partículas; Baixa isolamento com redução do volume do óleo;	10	7	2	140	Tratamento do óleo; Análise de gases dissolvidos; Análise físico-químico; Ensaio de contagem de partículas; Processo de secagem da parte ativa;
6	Radiador	Fazer circulação do óleo isolante para redução de temperatura realizado a dissipação de calor.	Vazamento de óleo; Falha na circulação de ar;	Aumento da temperatura; Sobrecarga; Queima do transformador;	Degradação das vedações; Circuitos das ligações danificados, Envelhecimento da carcaça; Sobrecarga; Vibração anormal;	4	5	3	60	Substituição das vedações; Termografia;
7	Ventiladores	Auxiliar na dissipação de calor, aumentando a eficiência térmica.	Falha no motor e ligações; Falha na circulação de ar;	Aumento da temperatura; vibração e ruído;	Danificação dos circuitos; Danos mecânicos; Sobrecarga;	3	6	3	54	Termografia; Substituição dos circuitos e motor; Substituição das juntas de vedações;
8	Relé de Gás (Buchholz)	Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo; Detectar a perda de óleo e o deslocamento súbito de óleo para o conservador.	Não atuar na coleta de gases; Não detectar a perda de óleo com a baixa pressão; Atuação indevida;	Operação incorreta;	Falha no sistema de preservação; Desligamento forçado;	7	3	5	105	Limpeza do visor; Verificar fiação; Verificar atuação do alarme e desligamento.
9	Indicador de Nível do Óleo	Detectar quando o volume do óleo do transformador estiver baixo e vazamentos.	Falha no sensor de nível, falha de sinal de alarme;	Operação incorreta;	Perda de resfriamento e isolamento com o óleo abaixo do nível indicado.	5	5	5	125	Limpeza do visor; Verificar fiação; Verificar atuação dos contatos;
10	Válvula de Alívio	Aliviar a pressão excessiva gerada entre gás e óleo quando se expandem de forma súbita.	Atuação indevida devido outros problemas internos; Falha na vedação;	Explosão do transformador;	Sobre pressão; Formação de gases dentro do transformador;	8	3	2	48	Verificar funcionamento do micro switch.
11	Secador de Ar	Remover a umidade do transformador.	Falha da absorção de umidade;	Saturação da sílica e gel;	Falta de troca da sílica em gel	5	8	1	40	Substituição da sílica em gel;
12	Tanque	Envolver o óleo e proteger a parte ativa.	Ambiente externo; Degradação da estrutura;	Vazamento e fissuras; Corrosão e oxidação;	Manutenção insuficiente;	3	5	2	30	Pintura; Tratamento da corrosão e oxidação; Verificar todas as

				Descamação da tinta						conexões de aterramento;
13	Conservador	Reservatório para expansão do óleo do transformador.	Falha na vedação; Falha na estrutura de apoio;	Contaminação do óleo;	Ruptura da bolsa de borracha ou do suplemento do comutador; Manutenção insuficiente;	4	3	4	48	Substituição das vedações; Pintura; Substituição das fixações;
14	Bolsa de Borracha	Permite as variações do volume do óleo, assim protegendo o óleo de qualquer tipo de contaminação.	Rachadura ou desgaste;	Contaminação do óleo do conservador;	Falta de troca/manutenção;	4	3	4	48	Substituição da bolsa de borracha; Troca das vedações;
15	Buchas	Isolar e permitir a passagem dos condutores.	Trincas; Falha na vedação; Falha no isolamento;	Contaminação externa, corrosão, corrente de descarga, explosões e falta de segurança.	Perda das propriedades dielétricas; Falta de limpeza e manutenção da porcelana;	10	7	3	210	Limpeza das porcelanas; Testes elétricos; Substituição das vedações; Verificar trincas ou partes quebradas, inclusive no visor de óleo Checar fixação, condições e alinhamento dos conectores, cabos e barramentos;
<u>SEVERIDADE (S)</u>			<u>PROBABILIDADE DE OCORRÊNCIA (O)</u>		<u>PROBABILIDADE DETECÇÃO (D)</u>		<u>RISCO (RPN)</u>			
Apenas Perceptível 1			Muito remota 1		Muito alta 1					
Pouca Importância 2,3			Muito pequena 2		Alta 2,3		Baixo 1 a 99			
Moderadamente grave 4,5,6			Pequena 3		Moderada 4,5,6		Moderado 100 a 500			
Grave 7,8			Moderada 4,5,6		Pequena 7,8		Alto 501 a 1000			
Extremamente Grave 9,10			Alta 7,8		Muito Pequena 9					