



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SEMIÁRIDO  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO  
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**EMANUEL BRUNO BEZERRA MARINS DE ARAÚJO**

**ANÁLISE FMEA PARA TRANSFORMADORES  
DE ALTA POTÊNCIA**

**SUMÉ - PB  
2018**

**EMANUEL BRUNO BEZERRA MARINS DE ARAÚJO**

**ANÁLISE FMEA PARA TRANSFORMADORES  
DE ALTA POTÊNCIA**

**Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Produção.**

**Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup> Vanessa Batista Schramm.**

**SUMÉ - PB  
2018**

A659a Araújo, Emanuel Bruno Bezerra Marins de.  
Análise FMEA para transformadores de alta potência. /  
Emanuel Bruno Bezerra Marins de Araújo. - Sumé - PB: [s.n],  
2018.

31 f.

Orientadora: Professora Dr<sup>a</sup> Vanessa Batista Schramm.

Monografia - Universidade Federal de Campina Grande;  
Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido; Curso de  
Engenharia de Produção.

1. Gestão da manutenção. 2. Transformadores de alta  
potência. 3. Análise FMEA. I. Título.

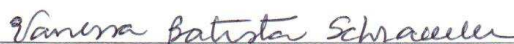
CDU: 62.7(043.1)

EMANUEL BRUNO BEZERRA MARINS DE ARAUJO

ANÁLISE FMEA PARA TRANSFORMADORES DE ALTA POTÊNCIA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia de Produção do Centro de Desenvolvimento Sustentável do Semiárido da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção ao título de Bacharel em Engenharia de Produção, sob orientação da profa. Dra. Vanessa Batista Schramm.

BANCA EXAMINADORA



**Profa. Dra. Vanessa Batista Schramm**

UAEP/CDSA/UFPG

Orientadora



**Profa. Dra. Cecir Barbosa de Almeida Farias**

UAEP/CDSA/UFPG

Examinadora



**Prof. Dr. Rômulo Augusto Ventura Silva**

UAEP/CDSA/UFPG

Examinador

Sumé – PB, 27 de novembro de 2018.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

À minha mãe, que sempre me apoiou, especialmente nos momentos mais difíceis, pois em tudo sempre tive seu apoio.

A Professora Dra. Vanessa Batista Schramm, que aceitou me orientar e se tornou para mim, nos períodos finais da graduação, um exemplo de profissional. Agradeço a atenção e a confiança.

Agradeço à minha família, minha tia Gil e minha prima Lisyane por todo o carinho e entusiasmo com a minha felicidade, ao meu irmão Júnior, por quem tenho um cuidado e um carinho imenso, à minha irmã, que sempre esteve ao meu lado nas decisões que a vida exige e, também, por ter me dado os melhores e mais fofos sobrinhos que eu poderia ter. Amo vocês!

Aos meus amigos, que sempre me suportaram e estiveram comigo nos momentos tristes e felizes da vida (Ianca Isabela, José Roberto, Maiara Alves, Livia Malta e Maria Vitória).

Agradeço ao Wanderlan, com quem partilho nos últimos anos todas as tristezas e felicidades, momentos de estresse e descontração.

Na pessoa do Prof. Dr. Daniel Augusto de Moura Pereira, agradeço a todos os professores da UFCG/CDSA, especialmente aos da Unidade Acadêmica de Engenharia de Produção, por todos os conhecimentos e oportunidades de crescimento nos últimos anos.

Agradeço também à professora Dra. Cecir Barbosa de Almeida Farias e ao professor Dr. Rômulo Augusto Ventura Silva, que aceitaram dialogar comigo sobre este trabalho.

Agradeço, de modo muito especial, às pessoas que duvidaram da minha capacidade, agradeço por todas as dúvidas, pois elas me ensinaram a querer ser sempre uma pessoa melhor.

E por fim, ao Senhor Deus, que me deu forças para suportar todos os momentos difíceis e que sempre me abençoa com o dom da sabedoria, para caminhar na luta pelo conhecimento.

## RESUMO

O presente trabalho tem o objetivo de desenvolver uma análise de modos de falhas e seus efeitos para componentes do sistema de proteção de transformadores de potência. O desenvolvimento metodológico da pesquisa consiste na identificação dos sistemas e subsistemas do transformador, das funções requeridas para cada componente, sob um ponto de vista *top-down*. Depois, foi feito o levantamento dos modos de falha, as causas e os efeitos para o subsistema de proteção. Foram levantados 30 modos de falhas e 87 causas a partir de um levantamento extensivo encontrado na literatura técnica internacional e brasileira. O estudo pode ser útil para direcionar os esforços das equipes de manutenção preventiva, dando informações de como o equipamento pode falhar, e quais eventos levam a essa falha. Deste modo, a geração desse banco de dados possibilita o seu uso nos sistemas de manutenção, assim como, nos sistemas de pesquisa e desenvolvimento de projetos de novos transformadores que visam evitar mecanismos de falha.

**Palavras-chave:** Sistema de Proteção. Transformador. Falhas. FMEA.

## **ABSTRACT**

This work aims to develop an analysis of failure modes and their effects for components of the protection system of power transformers. The methodological development of the research consists in the identification of systems and subsystems, and functions required for each component, using for this a top-down perspective. Then, it was identified a list of failure modes, causes and effects for the protection subsystem. A set of 30 failure modes and 87 causes were identified from an extensive survey the international and Brazilian technical literature. This study can be useful for directing the efforts of preventive maintenance teams, giving information on how equipment can fail, and which events lead to this failure. In this way, the generation of this database allows your use in maintenance systems, as well as in research and development of new transformers projects which aim to prevent failure mechanisms.

**Keywords:** Protection System. Transformer. Failures. FMEA.

## LISTA DE ABREVIATURAS

- ABNT** – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AIAG** – Automotive Industry Action Group
- ANEEL** – Agência Nacional de Energia Elétrica
- APQP** – Advanced Product Quality Planning and Control Plan
- CDC** – Comutador de tap sob carga
- CDST** – Comutador de tap sem carga e sem tensão
- CGMPs** – Current Good Manufacturing Practices
- CIGRÉ** – Comitê Internacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica
- DVP&R** – Relatório e Plano de Verificação de Projeto
- FMEA** - *Failure Mode and Effect Analysis*
- IEC** – International Electrotechnical Commission
- ISO** – *International Organization for Standardization*
- MASP** – Método de Análise e Solução de Problemas
- MIL** – MILITARY STANDARD
- NASA** – National Aeronautics and Space Administration
- NBR** – Norma Brasileira
- NPR** – Número de Prioridade de Risco
- ONS** – Operador Nacional do Sistema Elétrico
- PCHs** – Pequenas centrais hidrelétricas
- P&D** – Pesquisa e desenvolvimento
- POP** – Procedimento Operacional Padrão
- QS** – Quality System Requirements
- RBD** – Reliability Block Diagram
- SAE** – Society of Automotive Engineers



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Desenvolvimento da FMEA .....	20
<b>Figura 2</b> - Sistema e subsistema do transformador.....	23
<b>Figura 3</b> - Estrutura FMEA do Sistema de Proteção – TRANSFORMADOR. ....	41

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Conceitos básicos.....	16
<b>Quadro 2</b> - Lista de materiais utilizados.....	21
<b>Quadro 3</b> - Subsistemas e componentes.....	23
<b>Quadro 4</b> - Análise funcional dos componentes.....	24
<b>Quadro 5</b> - Modos de falha.....	25
<b>Quadro 6</b> - Causas. ....	27
<b>Quadro 7</b> - Efeitos. ....	33
<b>Quadro 8</b> - Classificação dos índices de Severidade (S).....	38
<b>Quadro 9</b> - Classificação dos índices de Ocorrência (O). ....	39
<b>Quadro 10</b> - Classificação dos índices de Detecção (D). ....	40
<b>Quadro 11</b> - Número de Prioridade de Risco (NPR).....	40

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 JUSTIFICATIVA.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	13
<b>1.2.1 Objetivo Geral.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2.2 Objetivos Específicos.....</b>	<b>13</b>
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	14
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>15</b>
2.1 HISTÓRICO.....	17
<b>3 ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>19</b>
3.1 ETAPAS DA PESQUISA .....	19
<b>4 RESULTADOS .....</b>	<b>22</b>
4.1 HIERARQUIZAÇÃO DO SISTEMA.....	22
4.2 ANÁLISE FUNCIONAL .....	24
4.3 LEVANTAMENTO DOS MODOS DE FALHA .....	25
4.4 LEVANTAMENTO DAS CAUSAS .....	27
4.5 LEVANTAMENTO DOS EFEITOS .....	32
4.6 AVALIAÇÃO DOS RISCOS .....	37
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>43</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>45</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>49</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em sistemas elétricos, um dos equipamentos de maior complexidade e de mais alto custo é o transformador de potência (FRONTIN, 2013). Transformadores de potência são máquinas estáticas que possibilitam a elevação ou a redução da tensão, de forma a minimizar as perdas do sistema de transmissão pela redução de corrente requerida para determinada potência elétrica transmitida (VASQUES, 2011). Para Pena (2003), inúmeros são os fatores que fazem do transformador um equipamento importante: além da sua operacionalidade, que garante a distribuição de energia com qualidade e segurança, os elevados custos de investimento, os prazos para a aquisição não-imediata, o elevado tempo de montagem e, ainda, os custos incorridos na interrupção do fornecimento de eletricidade.

O desligamento forçado é o ato de retirar de serviço um equipamento ou linha de transmissão, em condições não programadas, decorrente de falhas ou de desligamento de emergência (FRONTIN, 2013). Segundo o autor, no caso dos transformadores, as falhas são fatores determinantes neste tipo de desligamento, cujas origens são, na maioria das vezes, desconhecidas.

Apesar de todos os avanços tecnológicos empenhados nos transformadores de potência, ainda não foi possível reduzir significativamente as taxas de falha (PENA, 2003), ao contrário disso, o autor acrescenta que as elevações nos níveis de potência dos transformadores, aumentam ainda mais o leque de mecanismos que podem provocar falhas nesses equipamentos.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é realizar uma análise dos modos de falha e seus efeitos em transformadores de potência, utilizando a ferramenta FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*). Espera-se que esta análise se configure em um banco de dados sobre falhas em transformadores que possa ajudar no direcionamento das atividades de manutenção preventiva deste tipo de equipamento, bem como apoiar a fase de projeto dos transformadores, visando evitar os mecanismos que provocam falhas.

Portanto, a desafio para o desenvolvimento e a aplicação da FMEA, neste trabalho, é proporcionar ao operador um mecanismo com os possíveis modos e efeitos de falha esperados nas condições permanentes de uso do transformador. Deste modo, o uso de ferramentas para análise de riscos envolvidos nas condições de uso dos equipamentos de potência mostra-se de extrema relevância, dada a importância da manutenção e da continuidade do fornecimento de energia em nosso país.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

O grande desafio das empresas privadas e estatais, responsáveis pela distribuição de energia, além da distribuição eficiente e de qualidade, é a redução dos custos decorrentes do desligamento forçado dos transformadores. Segundo Frontin (2013), em uma análise realizada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2009, o desligamento forçado dos transformadores, por ano, chegou a quantidade de 2.349 equipamentos: 56,28% desses desligamentos ocorrem em transformadores de 138kV; 26,28% são transformadores de 230kV; e, em menor quantidade, os transformadores de 750 kV correspondem a 0,59%.

Os investimentos em transmissão de 2012 até 2021 serão de R\$ 55,8 bilhões, sendo que, deste total, R\$ 36,3 serão destinados a linhas de transmissão e R\$ 19,5 bilhões a subestações (FRONTIN, 2013), onde boa parte do investimento é destinado a transformadores com falhas.

Portanto, qualquer iniciativa voltada para mitigar as falhas e/ou seus efeitos em transformadores de potência é de extrema importância, pois, a falta do fornecimento de energia elétrica, por menor que seja o intervalo, implica em grandes prejuízos, além de reduzir os custos com manutenções corretivas emergenciais e garantir o fornecimento de energia (VASQUES, 2011), além de colaborar com o desenvolvimento de novos mecanismos de apoio ao Programa de P&D da ANEEL.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise FMEA no sistema de proteção do transformador de potência.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Hierarquização do transformador de potência em subsistemas e componentes;
- Descrição funções básicas dos principais componentes de transformadores;
- Levantamento extensivo dos principais modos de falha e as respectivas causas, bem como os efeitos destas falhas na confiabilidade do transformador.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco seções: a Seção 2 apresenta toda a fundamentação teórica para a FMEA; a Seção 3 apresenta os aspectos metodológicos do estudo; a Seção 4 apresenta os resultados do estudo; e, por fim, na Seção 5, apresentam-se as considerações finais da pesquisa, assim como propostas para trabalhos futuros nesse campo de investigação.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A FMEA é um método indutivo que permite a análise de componentes de um sistema de forma sistemática em relação aos vários modos de falha que poderão ocorrer, assim como as respectivas causas e efeitos no funcionamento e segurança do sistema (SOBRAL; ABREU, 2013). Com isso, é possível identificar a necessidade de ações corretivas para prevenir falhas, impedindo que elas sejam notadas pelos clientes, o que colabora para o aumento da confiabilidade, durabilidade e qualidade de um produto ou serviço (STAMATIS, 2003).

Para Palady (1997), a FMEA é uma técnica de baixo risco e de alta eficiência para a identificação das soluções preventivas e a eficácia, em termos de custos. A FMEA consegue auxiliar a identificação, priorização e melhoria de um sistema/produto antes da ocorrência dos eventos de falha, ajudando na melhoria contínua e na redução de custos (INOUE; YAMADA, 2010). Para Slack *et al.* (2009), a FMEA é um procedimento para auxiliar o desenvolvimento e a execução de projetos, processos ou serviços novos ou revisados. Cavalcanti *et al.* (2011), por sua vez, acrescentam que, de forma geral, a utilização dessa ferramenta aumenta a qualidade do produto final, na medida em que elimina ou inibe os efeitos negativos dos riscos sobre as áreas de projeto, permitindo obter, em cada segmento, uma maior conformidade com as expectativas do cliente.

Assim, a FMEA pode ser classificada com uma ferramenta que segue a filosofia da gestão da qualidade total, tendo por objetivo avaliar e minimizar os riscos de um produto ou processo, recorrendo, para isso, à análise de falhas (determinação da causa, o respectivo efeito para cada falha) (SANTOS, 2011).

Segundo Moura (2000), a FMEA é o resultado do trabalho de uma equipe, ao longo do desenvolvimento e do planejamento de um processo que inclui a análise dos pontos que podem falhar, com base na experiência e nos problemas do passado.

Nesse sentido, o Quadro 1 resume os conceitos básicos envolvidos no estudo da FMEA.

**Quadro 1** - Conceitos básicos.

<b>Conceito</b>	<b>Descrição</b>
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).
Causas 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).
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).

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

- possibilita a obtenção de um banco de dados/catálogo sobre as falhas dos produtos e/ou processos;
- melhor conhecimento sobre os problemas existentes;
- as ações para desenvolvimento de melhorias no projeto do produto/processo são baseadas em um banco de dados específico e controlado (Kaisen);
- controle e redução dos custos através do planejamento e da prevenção de ocorrência de falhas;
- lista de classificação de modos de falhas potenciais, estabelecendo um sistema de priorização para considerações de ações corretivas;
- incorporar a organização uma atitude proativa de prevenção de falhas, de cooperação e de trabalho em equipe, com a preocupação constante com a qualidade.

A aplicação da FMEA compreende diversas áreas, como o desenvolvimento de produtos, processos de fabricação, de serviços e ações de manutenção (SARDINHA; CLARO; PEREIRA, 2009). A indústria automobilística, por exemplo, faz uso dessa ferramenta para controlar e manter a qualidade especificada em seus produtos, desde os processos de fabricação dos componentes de seus automóveis, garantindo qualidade e confiabilidade em todos os processos e componentes envolvidos (HAQ; LIPOL, 2011).



Segundo a ReliaSoft Corporation (2014), alguns exemplos de aplicações práticas da FMEA são:

- avaliação do projeto de produtos e processos;
- desenvolvimento de estratégias de manutenção eficaz;
- integração na gestão de crescimento da confiabilidade;
- integração nos processos de DVP&R (Relatório e Plano de Verificação de Projeto) e APQP (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto);
- base de conhecimento para a solução de futuros problemas (MASP);
- *input* para outros sistemas de análise, tais como diagramas de blocos de confiabilidade (RBD), Análises de Markov, Árvore de Falhas, entre outros;
- inclusão das técnicas de Análise Probabilística de Riscos em equipamentos e instalações de plantas industriais de produção contínua;
- desenvolvimento para atender às exigências do cliente e/ou para cumprir os requisitos de segurança e qualidade, em sistemas como: ISO 9001, QS 9000; ISO / TS 16949; 6 Sigma; CGMPs; Process Safety Management Act.

Além da utilização da FMEA nos meios mais distintos, podemos observar seu uso, também, no setor energético. Hoseynabadi, Oraee e Tavner (2010) utilizaram a FMEA para estudar a confiabilidade de turbinas eólicas usando um software para essa análise. Nesse estudo foi realizada uma comparação entre os resultados quantitativos obtidos no uso da FMEA e os dados recolhidos no terreno sobre a confiabilidade de turbinas eólicas, para discutir as relações entre os dados obtidos, que podem ser úteis para futuros projetos de turbinas eólicas.

A seguir, apresenta-se um histórico de como surgiu a FMEA, até sua normalização para aplicação em segmentos específicos.

## 2.1 HISTÓRICO

A primeira referência sobre a ferramenta FMEA surgiu em 1949 quando o exército norte-americano foi responsável pelo desenvolvimento do procedimento militar MIL-P-1629, com o título “*Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis*”, utilizado como uma técnica para avaliar as taxas de confiabilidade do desenvolvimento do projeto, em que foram detectadas as possíveis falhas e seus efeitos em seus sistemas e

componentes, para então classificar o seu impacto no sucesso do projeto empreendido e na segurança dos usuários e equipamentos (SMITH, 2014).

No ano de 1960, a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) aplicou variações da ferramenta desenvolvida pelos militares para a utilização em seus requisitos de confiabilidade. Em 1966, por sua vez, a NASA aplicou a FMEA no progresso do programa espacial APOLLO, visando a minimizar as falhas existentes nos equipamentos, os quais ficariam impossibilitados de ser reparados após o lançamento, fato que, ocasionalmente, despertava problemas de confiabilidade no sistema e segurança de todos os tripulantes. (PEDROSA, 2014).

No início da década de 1970, a *FORD Motor Company* iniciou o uso disseminado desta metodologia na comercialização de produtos e serviços, após o insucesso do FORD Pinto, que, em colisões traseiras, sofria a ruptura do tanque de combustível com extrema facilidade, o que normalmente provocava incêndio e, ao mesmo tempo, impossibilitava a saída dos ocupantes do veículo, por causa da deformação que ocasionava nas portas. No ano de 1974, a FMEA torna-se uma norma, quando a marinha norte-americana substitui o procedimento MIL-P-1629 pela norma militar MIL-STD-1629<sup>a</sup> (GAVIN ROBBINS CONSULTING LTD, 2014).

Além disso, em 1988, a Organização Internacional de Normalização (ISO) desenvolve a ISO 9.000, forçando as organizações a desenvolverem sistemas de gestão da qualidade voltados para as necessidades, exigências e expectativas dos consumidores. Equivalente à ISO 9.000, a QS 9.000, hoje substituída pela ISO/TS 16.949, normalização para as indústrias automobilísticas, por sua vez, nasce com o objetivo de controlar o sistema de qualidade de toda a logística de suprimentos, resultado de um grupo de trabalho representado pela *Chrysler Corporation*, *FORD Motor Company* e *General Motor Corporation* (SMITH, 2014).

Já no ano de 1993, então, a *Automotive Industry Action Group* (AIAG) publica uma norma da FMEA para a indústria de automobilística. No ano seguinte, 1994, é criada a norma SAE J-1739 pela SAE (*Society of Automotive Engineers*), para o desenvolvimento da Análise dos Modos de Falha Potencial e seus Efeitos no Design, nos Processos de Fabricação e Montagem e em Máquinas, que oferece traços gerais para a realização de uma FMEA (PEDROSA, 2014).

Como se pode notar, ao longo dos anos a FMEA foi se consolidando e melhorando até estabelecer-se em seu formato atual, conforme hoje é utilizada.

### 3 ASPECTOS METODOLÓGICOS

Nesta seção serão apresentadas as etapas do estudo, ou seja, da análise FMEA.

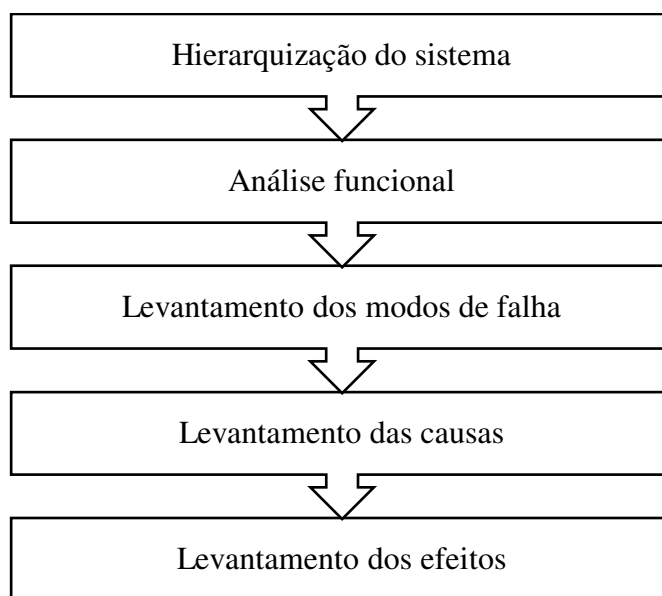
#### 3.1 ETAPAS DA PESQUISA

Independentemente da FMEA, a sua aplicação parte de princípios correlacionados. Segundo Capaldo *et al.* (2006), tais princípios consistem na identificação do equipamento, das suas funções, dos tipos de falha em potencial, das causas e dos efeitos da falha.

Para *Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation* (1993), a FMEA possibilita a visualização do sistema, sob o ponto de vista macro (*top-down*) ou, ainda, partindo dos modos de falha em seus subsistemas, até as falhas do sistema (*bottom-up*), avaliando, deste modo, as possíveis consequências.

Na sequência, segundo Toledo e Amaral (2006), são avaliados os riscos de cada modo de falha por meio de índices e, com base nessa avaliação, são planejadas as ações que possibilitam a sua redução. Para a avaliação do risco, levam-se em consideração quatro índices: Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D) e Número de Prioridade de Risco (NPR). Para Toledo e Amaral (2006), as avaliações desses índices são independentes entre si.

Segundo o CEI - IEC 60812 (2006) e *Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation* (1993), a aplicação da FMEA é dividida em fases de desenvolvimento (Figura 1).

**Figura 1** - Desenvolvimento da FMEA.

**Fonte:** Autor (2018).

A seguir é apresentada uma descrição das etapas realizadas neste estudo, que corresponde a aplicação da FMEA a transformadores de potência.

Para a hierarquização do sistema, foi feita a identificação dos subsistemas que compõe o transformador de potência e realizada a 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 da compreensão de como cada função pode falhar. Dada a complexidade dos mecanismos de falhas no transformador, o estudo foi feito apenas para o subsistema de proteção. A escolha é justificada este subsistema é um dos que mais contribui para falhas no 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 do sistema e/ou do subsistema.

Para a realização destas etapas, foram consultados manuais e normas técnicas (ABNT/NBR, ANEEL, CIGRÉ, IEC, ISO, SAE), tese de doutorado, dissertações de mestrado e publicações desenvolvidas no âmbito do Programa de P&D da ANEEL. O Quadro 2 lista os materiais utilizados para a realização da FMEA do transformador.

**Quadro 2** - Lista de materiais utilizados.

<b>ID</b>	<b>Autor (es)</b>	<b>Título</b>	<b>Ano</b>
1	AJEJE, G. A. F.	Fuzzy-FMEA: Uso da lógica Fuzzy para ponderação das falhas do FMEA.	2015
2	ALVES, D. P.; NOGUEIRA, D. S.	Transformadores de Potência – Teoria e Aplicação.	2009
3	ANSI.	Tabela ANSI (American National Standards Institute).	2018
4	BECHARA, R.	Análise de falhas em transformadores de potência.	2010
5	CARPINETTI, L. C. R.	Gestão de qualidade: conceitos e técnicas.	2010
6	DAILEY, K. W.	The FMEA Pocket Handbook.	1983
7	DUPONT, C. J.	Integração de análises de defeitos e definição de um grau de risco global para transformadores de potência.	2003
8	FAIER, J. M.	Curvas principais aplicadas na identificação de descargas parciais em equipamentos de potência.	2006
9	FONSECA, J. F.	Elementos de manutenção de transformadores de potência.	2014
10	FUJITA, S. <i>et al.</i>	Experimental Investigation of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings.	1998
11	IEC 60300-3-11.	Guide d'application – maintenance basée sur la fiabilité.	2010
12	LINS, B. F.	Ferramentas básicas da qualidade.	1993
13	MAMEDE FILHO, J.	Manual de equipamentos elétricos.	2011
14	MARQUES, A. P.	Eficiência energética e vida útil de transformadores de distribuição imersos em óleo mineral isolante.	2004
15	MARTIGNONI, A.	Transformadores.	1991
16	MARTINS, D. L.	Estudo de caso na automação, proteção e supervisão de uma subestação de classe 69kV.	2012
17	SÁ, A. L. C. R.; NEPOMUCENO, P. R.	Avaliação do grau de polimerização antes e após a secagem de transformadores em fábrica.	1997
18	SCARDAZZI, A.	Ferramentas para o monitoramento da vida útil de transformadores.	2007
19	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.	2008
20	TEOH, P.; CASE, K.	Failure Modes and Effects Analysis through Knowledge Modelling.	2004

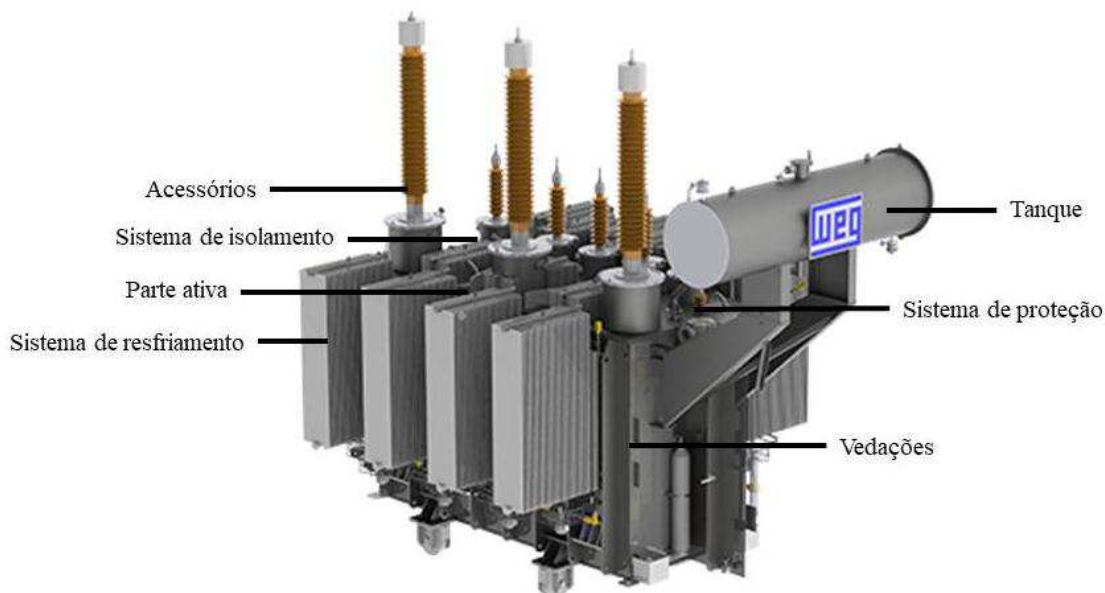
**Fonte:** Autor (2018).

## 4 RESULTADOS

Esta seção apresenta a análise de modos de falha e seus efeitos para o sistema do transformador de potência. Para isso, inicialmente realizou-se a hierarquização em subsistemas e componentes. Para cada componente, foram estudadas as funções básicas e depois se fez um levantamento extensivo dos principais modos de falha e as respectivas causas, bem como os efeitos destas falhas na confiabilidade do transformador, encontrados nos manuais e normas técnicas (ABNT, ANEEL, CIGRÉ, IEC, ISSO, NBR, SAE), tese de doutorado, dissertações de mestrado e em publicações desenvolvidas no âmbito do Programa de P&D da ANEEL. O resultado deste estudo pode ser utilizado para a avaliação de criticidade dos modos de falha, com base na frequência com que eles ocorrem, na severidade de seus efeitos e no nível de dificuldade de identificação da falha e/ou o mecanismo que pode provocá-la.

### 4.1 HIERARQUIZAÇÃO DO SISTEMA

Para a análise dos modos de falha ocorridos em transformadores de potência, é necessário que se faça o levantamento dos principais componentes que o constituem. Para isso, realizou-se a hierarquização do sistema em subsistemas e componentes, como pode ser observado na Figura 2. Os subsistemas do transformador são: (i) Parte ativa; (ii) Sistema de isolamento; (iii) Sistema de resfriamento; (iv) Tanque (principal e de expansão); (v) Acessórios; (vi) Vedações; e (vii) Sistema de proteção.

**Figura 2** - Sistema e subsistema do transformador.

**Fonte:** WEQ 2018<sup>1</sup>.

Podemos observar, no Quadro 3, os componentes de cada subsistema do transformador de potência.

**Quadro 3** - Subsistemas e componentes.

<b>Subsistema</b>	<b>Componente</b>
Parte ativa	Núcleo
	Enrolamento
Isolamento	Papel
	Óleo
Resfriamento	Radiador
	Trocador de calor
	Bomba para circulação forçada
	Ventiladores
Proteção	Relé de gás (Buchholz)
	Relé indicador da temperatura do óleo isolante
	Relé indicador da temperatura do enrolamento
	Válvula de alívio de pressão do tanque principal
	Dispositivo impedor de manobra do CDST
	Relé de carcaça
	Comutador de derivações em carga (CDC)
	Comutador de derivações sem tensão (CDST)

**Fonte:** Autor (2018).

<sup>1</sup> Disponível em: <https://www.weg.net/institucional/BR/pt/>. Acesso em 13 de novembro de 2018.

**Quadro 3** - Subsistemas e componentes (Continuação).

<b>Subsistema</b>	<b>Componente</b>
Tanque	Principal
	Expansão
Vedações	Anel de vedação (O-ring) ou plásticas
Acessórios	Buchas

**Fonte:** Autor (2018).

## 4.2 ANÁLISE FUNCIONAL

Há funções esperadas para cada componente que compõe o sistema de proteção do transformador, uma vez que ele garante uma continuidade no fornecimento de energia, resultando, deste modo, em um sistema mais robusto e eficiente, conforme o Quadro 4.

**Quadro 4** - Análise funcional dos componentes.

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Função</b>	<b>Falha</b>
<b>1</b>	Relé de gás (Buchholz)	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Coletar as bolhas livres de gases presentes no óleo da tubulação entre o tanque e o conservador;</li> <li>○ Elevar o fluxo de óleo na tubulação entre o tanque e o conservador.</li> </ul>	Falha no Relé de gás
<b>2</b>	Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Medir a temperatura da camada do óleo abaixo da tampa.	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante
<b>3</b>	Relé indicador da temperatura do enrolamento	Medir a temperatura do enrolamento	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento
<b>4</b>	Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Eliminar a evolução de sobrepressão interna no tanque.	Falha na Válvula de alívio de pressão do tanque principal
<b>5</b>	Dispositivo impedor de manobra do Comutador de Derivações sem Tensão (CDST)	Evitar a operação do CDST com o transformador energizado com tensão.	Falha no Dispositivo impedor de manobra do CDST

**Fonte:** Adaptado de Frontin (2013) e Pena (2003).



**Quadro 4** - Análise funcional dos componentes (Continuação).

ID	Componente	Função	Falha
6	Relé de carcaça	Detectar curto-circuito entre o enrolamento e o tanque do transformador.	Falha no Relé de carcaça
7	Comutador de Derivações em Carga (CDC)	Mudar as ligações das derivações de um enrolamento, sendo adequado para operação com o transformador, energizado, em vazio ou em carga.	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)
8	Comutador de Derivações sem Tensão (CDST)	Selecionar ligações de derivações dos enrolamentos com o transformador desenergizado.	Falhas em Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)

**Fonte:** Adaptado de Frontin (2013) e Pena (2003).

#### 4.3 LEVANTAMENTO DOS MODOS DE FALHA

Modos de falha de acordo com os dados históricos encontrados na pesquisa bibliográfica para cada componente do sistema de proteção do transformador. O Quadro 5, decompõe o componente, a falha e o seu modo de falha.

**Quadro 5** - Modos de falha.

ID	Componente	Falha	Modo de falha
1	Relé de gás (Buchholz)	Falha no Relé de gás	Baixo isolamento de contato no relé
			Quebra do eixo de sustentação da bóia
			Penetração de óleo isolante na bóia (oca)
			Afundamento da bóia (maciça)
			Afundamento da bóia (oca)
			Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética
			Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação
			Atuação indevida por vácuo no relé
			Atuação indevida por falta de óleo no relé

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 5** - Modos de falha (Continuação).

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Função</b>	<b>Modo de falha</b>
<b>2</b>	Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Baixo isolamento do contato do relé
			Atuação indevida por impacto
			Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé
			Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética
<b>3</b>	Relé indicador da temperatura do enrolamento	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação
			Baixo isolamento de contato no relé
			Atuação indevida por impacto
			Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé
<b>4</b>	Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Falha na Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação
			Baixo isolamento de contato no relé
			Atuação indevida por impacto
<b>5</b>	Dispositivo impedor de manobra do CDST (Comutador de Derivações sem Tensão)	Falha no Dispositivo impedor de manobra do CDST	Baixo isolamento entre os contatos da microchave
			Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave
<b>6</b>	Relé de carcaça	Falha no Relé de carcaça	Atuação indevida por curto-circuito
<b>7</b>	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no mecanismo de acionamento motorizado
			Falha nas hastes e na caixa de transmissões
			Falha na chave comutadora (desviadora)
			Falha no seletor e pré-seletor
<b>8</b>	Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falhas em Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falha no filtro absorvente
			Falha na redução da superfície de contato
			Desenergização do transformador

**Fonte:** Autor (2018).

#### 4.4 LEVANTAMENTO DAS CAUSAS

Causas de maior probabilidade para cada modo de falha, apontados para os componentes do sistema de proteção do transformador, conforme o Quadro 6.

**Quadro 6 - Causas.**

ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa
1	Relé de gás (Buchholz)	Falha no Relé de gás	Baixo isolamento de contato no relé	Contaminação por umidade, oxigênio e outros poluentes (animais/insetos)
			Quebra do eixo de sustentação da bóia	Vibração excessiva na tubulação que interliga o tanque principal ao auxiliar
			Penetração de óleo isolante na bóia (oca)	Falha na solda da bóia
				Bóia furada pelo parafuso de fixação
			Afundamento da bóia (maciça)	Incompatibilidade do material da bóia maciça com óleo
			Afundamento da bóia (oca)	Quebra do eixo de sustentação da bóia
				Penetração de óleo isolante na bóia (oca)
				Atuação indevida do contato da ampola
			Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Vibração mecânica no relé
				Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)
Fluxo e deslocamento de óleo				

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 6 - Causas (Continuação).**

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>
<b>1</b>	Relé de gás (Buchholz)	Falha no Relé de gás	Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé	Degradação material isolante
				Contaminação por umidade
				Utilização de emendas na fiação e réguas intermediárias
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração)
				Desajuste durante transporte e/ou montagem do transformador
Atuação indevida por vácuo no relé	Válvula isolamento relé fechada			
	Falha no sistema de preservação			
		Atuação indevida por falta de óleo no relé	Quantidade insuficiente de óleo no transformador	
<b>2</b>	Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Baixo isolamento de contato do relé	Penetração de umidade
				Penetração animais/insetos
			Atuação indevida por impacto	Impacto da porta do armário no relé
				Desprendimento do relé
			Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé	Degradação material isolante
				Penetração de umidade
Utilização de emendas na fiação e réguas intermediárias				

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 6 - Causas (Continuação).**

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>
<b>2</b>	Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração) Desajuste durante transporte/montagem do transformador
<b>3</b>	Relé indicador da temperatura do enrolamento	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	Baixo isolamento de contato no relé	Penetração de umidade Penetração animais/insetos
			Atuação indevida por impacto	Impacto da porta do armário no relé Desprendimento do relé
			Baixo isolamento das régua terminais e fiação do relé	Degradação material isolante
				Penetração de umidade Utilização de emendas na fiação e régua intermediárias
			Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração)
Desajuste durante transporte e/ou montagem do transformador				
<b>4</b>	Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Falha na Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)
				Vibração

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 6 - Causas (Continuação).**

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>
<b>5</b>	Dispositivo impedor de manobra do CDST (Comutador de Derivações sem Tensão)	Falha no Dispositivo impedor de manobra do CDST (Comutador de Derivações sem Tensão)	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)
<b>6</b>	Relé de carcaça	Falha no Relé de carcaça	Atuação indevida por curto-circuito	Curto-circuito dos circuitos auxiliares de alimentação de ventiladores, das motobombas, dos mecanismos de acionamento do comutador de tape, da resistência de aquecimento dos armários
<b>7</b>	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no mecanismo de acionamento motorizado	Quebra do dispositivo de disparo Quebra e/ou folga das engrenagens Falha na chave auxiliar/contatores/ disjuntores Umidade excessiva nos armários (corros) Solda fria conexão elétrica Falha rolamento

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 6 - Causas (Continuação).**

<b>ID</b>	<b>Componente</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>
7	Comutador de Derivações em Carga (CDC)	Falha no Comutador de Derivações em Carga (CDC)	Falha nas hastes e caixa de transmissões	Falha rolamento
				Desacoplamento das hastes e/ou caixa transmissão
				Alinhamento incorreto hastes e/ou caixa
				Falta de folga longitudinal para dilatação das hastes
				Lubrificação deficiente na caixa de transmissão
			Falha na chave comutadora (desviadora)	Conexões elétricas folgadas sem travamento
				Reator e/ou Resistor transição aberto
				Reator e/ou Resistor transição aquecido
				Contato gasto e/ou diferença auxiliar e/ou principal
				Contato desalinhado
				Contato pouca pressão
				Rompimento condutores fixos
				Falha solda contato
				Defeito na mola
				Defeito no mecanismo de transmissão
				Defeito na lâmina de amortecimento
				Falta de sincronização entre a desviadora com seletora
				Defeito na cordoalha

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 6 - Causas (Continuação).**

ID	Componente	Falha	Modo de Falha	Causa
7	Comutador de Derivações em Carga (CDC)	Falha no Comutador de Derivações em Carga (CDC)		Defeito na cordoalha
				Degradação da suportabilidade dielétrica
				Curto-circuito no resistor
			Falha no seletor e pré-seletor	Elevada tensão de restabelecimento
				Baixa pressão contato
				Operação além do fim de curso
				Quebra transmissão
				Desalinhamento contatos
				Má conexão e/ou resistência. Polarização
				Degradação da suportabilidade dielétrica
			Falha no filtro absorvente	Inversão tubulações
				Filtro saturado
				Desprendimento de material
				Inversão sequência fase motobomba
Falha automatismo				
Deficiência na drenagem do ar após montagem e/ou manutenção				
Entrada de ar				
8	Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falhas em Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falha na redução da superfície de contato	Deformação nas hastes isolantes
				Folgas excessivas nas hastes de transmissão
				Fadiga molas contatos
			Desenergização do transformador	Operacional

**Fonte:** Autor (2018).

#### 4.5 LEVANTAMENTO DOS EFEITOS

O efeito está relacionado à falha, como podemos observar no Quadro 7, a apresentação dos efeitos de acordo com os modos de falha e causas de cada componente do sistema de proteção do transformador de potência.



Quadro 7 - Efeitos.

ID	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito
1	Falha no Relé de gás	Baixo isolamento de contato no relé	Contaminação por umidade, oxigênio e outros poluentes (animais/insetos)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
		Quebra do eixo de sustentação da bóia	Vibração excessiva na tubulação que interliga o tanque principal ao auxiliar	
		Penetração de óleo isolante na bóia (oca)	Falha na solda da bóia	
			Bóia furada pelo parafuso de fixação	
		Afundamento da bóia (maciça)	Incompatibilidade do material da bóia maciça com óleo	
		Afundamento da bóia (oca)	Quebra do eixo de sustentação da bóia	
			Penetração de óleo isolante na bóia (oca)	
			Atuação indevida do contato da ampola	
		Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Vibração mecânica no relé	
			Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)	
			Fluxo e deslocamento de óleo	
		Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé	Degradação material isolante	
			Contaminação por umidade	
Utilização de emendas na fiação e réguas intermediárias				
Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração)			
	Desajuste durante transporte e/ou montagem do transformador			

Fonte: Autor (2018).

**Quadro 7** - Efeitos (Continuação).

<b>ID</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>	<b>Efeito</b>
<b>1</b>	Falha no Relé de gás	Atuação indevida por vácuo no relé	Válvula isolamento relé fechada Falha no sistema de preservação	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
		Atuação indevida por falta de óleo no relé	Quantidade insuficiente de óleo no transformador	
<b>2</b>	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Baixo isolamento contato do relé	Penetração de umidade	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Penetração animais/insetos	
		Atuação indevida por impacto	Impacto da porta do armário no relé	
			Desprendimento do relé	
		Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé	Degradação material isolante	
			Penetração de umidade	
			Utilização de emendas na fiação e réguas intermediárias	
Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)			
Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração)			
	Desajuste durante transporte/montagem do transformador			
<b>3</b>	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	Baixo isolamento contato do relé	Penetração de umidade	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Penetração animais/insetos	
		Atuação indevida por impacto	Impacto da porta do armário no relé	
			Desprendimento do relé	
		Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé	Degradação material isolante	
			Penetração de umidade	
			Utilização de emendas na fiação e réguas intermediárias	
Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)			

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 7** - Efeitos (Continuação).

<b>ID</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>	<b>Efeito</b>
<b>3</b>	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Defeito de fabricação (erro de calibração)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Desajuste durante transporte e/ou montagem do transformador	
<b>4</b>	Falha na Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Vibração	
<b>5</b>	Falha no Dispositivo de manobra do CDST	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
<b>6</b>	Falha no Relé de carcaça	Atuação indevida por curto-circuito	Curto-circuito dos circuitos auxiliares de alimentação de ventiladores, das motobombas, dos mecanismos de acionamento do comutador de tape, da resistência de aquecimento dos armários	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
<b>7</b>	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no mecanismo de acionamento motorizado	Quebra do dispositivo de disparo	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Quebra e/ou folga das engrenagens	
			Falha na chave auxiliar/contatores/disjuntores	
			Umidade excessiva nos armários (corros)	
			Solda fria conexão elétrica	
			Falha rolamento	

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 7** - Efeitos (Continuação).

<b>ID</b>	<b>Falha</b>	<b>Modo de falha</b>	<b>Causa</b>	<b>Efeito</b>
<b>7</b>	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nas hastes e caixa de transmissões	Falha rolamento	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Desacoplamento das hastes e/ou caixa transmissão	
			Alinhamento incorreto hastes e/ou caixa	
			Falta de folga longitudinal para dilatação das hastes	
			Lubrificação deficiente na caixa de transmissão	
		Falha na chave comutadora (desviadora)	Conexões elétricas folgadas sem travamento	
			Reator e/ou Resistor transição aberto	
			Reator e/ou Resistor transição aquecido	
			Contato gasto e/ou diferença auxiliar e/ou principal	
			Contato desalinhado	
			Contato pouca pressão	
			Rompimento condutores fixos	
			Falha solda contato	
			Defeito na mola	
			Defeito no mecanismo de transmissão	
			Defeito na lâmina de amortecimento	
			Falta de sincronização entre a desviadora com seletora	
			Defeito na cordoalha	
			Degradação da suportabilidade dielétrica	
			Curto-circuito no resistor	

**Fonte:** Autor (2018).

**Quadro 7** - Efeitos (Continuação).

ID	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito
7	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no seletor e pré-seletor	Elevada tensão de restabelecimento	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Baixa pressão contato	
			Operação além do fim de curso	
			Quebra transmissão	
			Desalinhamento contatos	
			Má conexão e/ou resistência. Polarização	
			Degradação da suportabilidade dielétrica	
		Falha no filtro absorvente	Inversão tubulações	
			Filtro saturado	
			Desprendimento de material	
			Inversão sequência fase motobomba	
			Falha automatismo	
			Deficiência na drenagem do ar após montagem e/ou manutenção	
Entrada de ar				
8	Falha nos Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falha na redução da superfície de contato	Deformação nas hastes isolantes	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.
			Folgas excessivas nas hastes de transmissão	
			Fadiga molas contatos	
		Desenergização do transformador	Operacional	

**Fonte:** Autor (2018).

#### 4.6 AVALIAÇÃO DOS RISCOS

A avaliação dos riscos é feita a partir da relação entre falha, modo de falha, causa e efeito, para assim elaborar a FMEA. A falha em um componente do sistema de proteção do transformador indica um funcionamento inadequado, o que compromete toda a função do sistema e do equipamento.

O modo de falha é umas das formas em que o componente opera, porém com sua eficiência reduzida, anunciando a presença de outros modos de falha para uma mesma falha. A causa, por sua vez, é o estado que provoca o modo de falha. E, por fim, o efeito se refere às

consequências sentidas pelo cliente com a interrupção do fornecimento de energia.

Para avaliação utilizam-se os índices de Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D) e (iv) Número de Prioridade de Risco (NPR), conforme os Quadros 8, 9, 10 e 11, respectivamente. O índice de Ocorrência (O) pode ser substituído por um índice próprio, com a relação quantitativa de ocorrência das falhas.

A severidade corresponde ao impacto negativo dos possíveis danos ambientais, pessoais e operacionais, que são provocados pelo efeito do modo de falha (SIQUEIRA, 2005). Segundo Moura (2000), a severidade pode ser a avaliação da gravidade do efeito do modo de falha para o componente, subsistema ou sistema.

Para estimar a severidade, podemos utilizar várias escalas descritas na literatura, desde uma escala subdividida em dez níveis qualitativos, até mesmo as apresentadas por Palady (1997), entre autores com escalas até mais simples, que utilizam apenas cinco níveis. O formulário utiliza um índice (S) que varia entre 1 e 10, subdividido em 7 níveis (Quadro 8).

**Quadro 8** - Classificação dos índices de Severidade (S).

<b>Categoria</b>	<b>Efeito</b>	<b>Critério (Severidade do efeito)</b>	<b>Índice de Severidade</b>
I	Perigo catastrófico	Índice de severidade muito alto quando o modo de falha potencial afeta a segurança ambiental, pessoal e econômica.	10
II	Crítico alto	Item inoperável, com perda das funções primárias, afetando a segurança ambiental, pessoal e econômica.	9
			8
III	Crítico	Item operável, mas com nível de desempenho reduzido.	7
			6
IV	Moderado	Item operável, mas com itens inoperáveis.	5
V	Moderado baixo	Item operável, mas com itens operáveis com nível de desempenho reduzido.	4
			3
VI	Moderado muito baixo	Item com operação inadequada, caracterizada por erros de projeto, construção não conforme. Defeito notado por operadores.	2
VII	Nenhum	Sem efeito.	1

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

O índice de ocorrência consiste na probabilidade de um modo de falha vir a ocorrer. Essa probabilidade pode ser estimada conforme o Quadro 9, numa escala de 1 a 10, com 5

possíveis categorias, conforme Moura (2000).

**Quadro 9** - Classificação dos índices de Ocorrência (O).

Ocorrência	Descrição	Taxa de falha observada por inspeção	Índice (O)
Frequente	A falha é considerada inevitável. Ocorrerá continuamente, reduzindo a segurança ambiental e operacional e aumentando os riscos econômicos.	$\geq 1$ em 2	10
		1 em 3	9
		1 em 4	8
Alta	A falha correrá várias vezes, sendo caracterizada por efeitos cumulativos de certa frequência.	1 em 8	7
		1 em 20	6
Moderada	A falha ocorrerá ocasionalmente, sendo caracterizada por efeitos não cumulativos ou transitórios.	1 em 80	5
		1 em 400	4
Baixa	A falha é passível de ocorrência, mas improvável. Acontecerá excepcionalmente.	1 em 1000	3
		1 em 1500	2
Improvável	Ocorrência inesperada, a falha praticamente não ocorrerá.	$\leq 1$ em 1500	1

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

A detecção (D) consiste na avaliação da eficácia dos controles de monitoramento definidos para identificar causas e modos de falhas, antes que o modo de falha inicie (SIQUEIRA, 2005). Para Siqueira (2005), a escala desse índice pode variar de 1 a 5 e apresenta uma ordem de grandeza inversa às ordens da Severidade e da Ocorrência, uma vez que é atribuída a pontuação mais baixa ao maior nível de detecção, conforme Quadro 10. Moura (2000), no Manual de Referência FMEA, chama a atenção para o fato de que um baixo índice de detecção não significa, necessariamente, um baixo índice de ocorrência, pelo que se deve avaliar a capacidade dos controles atuais do processo em detectar a baixa frequência de modos de falha.

**Quadro 10** - Classificação dos índices de Detecção (D).

<b>Detecção</b>	<b>Critério</b>	<b>Índice de detecção</b>
Improvável	Falha totalmente oculta, com sistemas de detecção indisponível.	4
Remota	Falha cumulativa, perceptível, mas não diagnosticada.	3
Provável	Probabilidade de detecção com o sistema atual de monitoramento e controle.	2
Fácil	Falha detectável.	1

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

Para a avaliação de risco, Siqueira (2005) afirma que o nível do risco é proporcional à ocorrência dos eventos ponderados pelos danos produzidos por causa do evento (severidade), quanto ao NPR (Número de Prioridade de Risco) que resulta do produto dos três índices referidos anteriormente (S – Severidade; O – Ocorrência; D – Detecção), conforme o Quadro 11.

**Quadro 11** - Número de Prioridade de Risco (NPR).

$$\text{NPR} = (\text{S}) \times (\text{O}) \times (\text{D})$$

**Fonte:** Moura (2000).

O dimensionamento da NPR tem como objetivo priorizar os modos de falha conforme uma escala decrescente. Analisando cada uma das tabelas dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, verificamos a atribuição do valor máximo de cada índice, obtendo a NPR que pode ser um valor/índice alarmante. Isso porque o valor máximo dos índices de Severidade, Ocorrência e Detecção corresponde respectivamente à “falha quase inevitável”. Para os índices de NPR altos, a equipe de monitoramento deve concentrar recursos a fim de reduzir o risco calculado, através de manutenções preditivas.

Para a análise desse índice e para suporte na interpretação do Número de Prioridade de Risco do sistema de proteção do transformador, a utilização do gráfico de Pareto deve ser aplicada como fase final da metodologia.

Segundo Werkema (1995), o gráfico dispõe as informações que permitem a concentração dos esforços no desenvolvimento de melhorias nas áreas que potencializam as ocorrências cuja severidade ocasiona riscos ambientais, operacionais e de segurança. Assim, o gráfico de barras, no qual se dispõem os dados a partir do maior NPR até o menor, e onde é traçada uma curva que mostra as porcentagens acumuladas de cada NPR, viabiliza a interpretação e o diagnóstico da FMEA, alertando para quais modos de falha apontam a





Para o sistema de proteção, não foram quantificados os índices de Severidade (S), Ocorrência (O), Detecção (D) e Número de Prioridade de Risco (NPR), uma vez que, para a sua quantificação são necessários dados informativos sobre as manutenções e os regimes de operação dos transformadores presentes nas subestações de energia, assim a FMEA para o subsistema foi estruturada para a sua aplicação por parte de seus analistas e operadores responsáveis pelos centros de distribuição.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o objetivo de realizar uma análise dos modos de falha e seus efeitos em transformadores de potência, esta pesquisa faz uma análise sistemática no transformador de potência, através da ferramenta FMEA. Com isso, possibilitamos o desenvolvimento de um robusto banco de dados de falhas, modos, causas e efeitos, relevantes ao sistema de proteção do transformador.

Inicialmente, procedemos a uma vasta pesquisa bibliográfica capaz de listar os subsistemas, componentes e funcionamento do equipamento. A partir de então, listamos os modos de falha que potencializam o surgimento das falhas, assim como seus efeitos e causas, o que nos permite, como se viu, o desenvolvimento aplicado da FMEA.

O desenvolvimento do presente trabalho culmina, portanto, num procedimento de aplicação prática da ferramenta FMEA no sistema de proteção, como também nos demais subsistemas do transformador de potência, uma vez que, de ser considerado o histórico do equipamento e os riscos de falhas internas e externas, para prolongar a vida útil do transformador. A pesquisa foca no sistema de proteção, devido ser um sistema complexo e que garante o funcionamento contínuo, com qualidade e segurança do transformador de potência.

A estrutura e o banco de dados sobre as falhas possam colaborar e direcionar os esforços das atividades de manutenção preventiva, dando informações aos operadores e analistas que podem usar desta ferramenta para desenvolvimento dos planos de manutenção, além de possibilitar as empresas fabricantes de transformadores, tomar conhecimento dos modos de falha listados, para então desenvolver projetos que visam evitar os mecanismos de falha.

Como limitação da pesquisa, a falta de dados referente aos transformadores dificulta a pesquisa, uma vez que, as empresas responsáveis pela fabricação e manutenções destes equipamentos não disponibilizam ou não possuem estas informações. A composição extensiva dos dados sobre as falhas, modos, efeitos e causas para o transformador de potência, alerta para uma análise minuciosa, uma vez que, o erro humano na análise de extensas tabelas, pode deixar de lado um modo que potencialize uma falha.

Como proposta para trabalhos futuros, recomenda-se, com base no que foi feito até aqui, a decomposição das falhas, dos modos, das causas e dos efeitos para os demais subsistemas (parte ativa, isolamento, resfriamento, tanque, vedações e acessórios), visto que

uma falha ou modo podem desencadear – e quase sempre desencadeiam – outras falhas e modos de falha. Assim como, a sua aplicação prática por meio de convênios com distribuidoras e empresas especializadas em manutenção de transformadores.

É importante ressaltar, por fim, que nenhum subsistema é independente e que a qualidade e a eficiência refletem no equipamento como um todo, o que torna importante a decomposição das falhas para os demais subsistemas, pilares fundamentais para o desenvolvimento de uma melhoria contínua.

## REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 5462. **Confiabilidade e manutenibilidade**. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1994.
- AJEJE, G. A. F. **Fuzzy-FMEA: Uso da lógica Fuzzy para ponderação das falhas do FMEA**. 54 f. 2015. Monografia (Graduação em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. Disponível em: <<http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180830/tce-22122015-161823/?&lang=br>>.
- ALVES, D. P.; NOGUEIRA, D. S. **Transformadores de Potência – Teoria e Aplicação**. 212 f. 2009. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10001033.pdf>>.
- ANSI. **Tabela ANSI** (American National Standards Institute). Campinas: Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2018. Disponível em: <<https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>>. Acesso em: 31 maio 2018, às 18h41min.
- BECHARA, R. **Análise de falhas em transformadores de potência**. 118 f. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- CAPALDO, D.; GUERRERO, V.; ROZENFELD, H.; **FMEA (Failure Model and Effect Analysis)**. 2006. Disponível em: <<http://www.ogerente.com.br/qual/dt/qualidade-dt-FMEA.htm>>. Acesso em: 20 mar. 2018.
- CARPINETTI, L. C. R. **Gestão de qualidade: conceitos e técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2010.
- CAVALCANTI, M. A. *et al.* **Aplicação do FMEA de projetos ao gerenciamento de riscos de um projeto no setor da construção naval**. Belo Horizonte: Enegep, 2011. Verificar se precisa colocar o nome dos demais autores – acredito que aqui precisa.
- CEI - IEC 60812. **Analysis Techniques for System Reliability – Procedure for Failure Mode and Effect Analysis FMEA**. 2<sup>nd</sup> ed. Geneva: IEC, 2006.
- DAILEY, K. W. **The FMEA Pocket Handbook**. Lancaster: DW Publishing Co.: 2004.
- Dietrich, W. *et al.* CIGRÉ WG 05. An International Survey on Failures in Large Power Transformers in Service. **ELECTRA**. n. 88, p. 21-47, 1983.
- DUPONT, C. J. **Integração de análises de defeitos e definição de um grau de risco global para transformadores de potência**. 221 f. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- FAIER, J. M. **Curvas principais aplicadas na identificação de descargas parciais em equipamentos de potência**. 111 f. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- FONSECA, J. F. **Elementos de manutenção de transformadores de potência**. 97 f. 2014.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Guaratinguetá, 2014.

FRONTIN, S O. **Equipamentos de alta de tensão**: prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. Brasília: Teixeira, 2013.

FUJITA, S. *et al.* Experimental Investigation of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings. **IEEE Transactions on Power Delivery**. v. 13, n. 4, p. 1201-1207, 1998.

GAVIN ROBBINS CONSULTING LTD. **Note on Benefits of FMEA/ FMECA**. Retrieved from Failure Modes & Effects Analysis (FMEA). London: FMEA Co. UK, 2014. Disponível em: <[http://www.fmea.co.uk/FMEA\\_benefits.html](http://www.fmea.co.uk/FMEA_benefits.html)>. Acesso em: 10 ago. 2018.

HAQ, J.; LIPOL, L. S. Risk Analysis Method: FMEA/FMECA in the Organizations. **International Journal of Basic & Applied Sciences**. v. 11, n. 5, p. 49-57, 2011.

HOSEYNABADI, H. A., ORAEE, H.; TAVNER, P. J. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for wind turbines. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**. v. 32, n. 7, p. 817-824, 2010.

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.

INOUE, H.; YAMADA, S. Failure Mode and Effects Analysis in Pharmaceutical Research. **International Journal of Quality and Service Sciences**. v. 2, n. 3, p. 369-382, 2010.

LINS, B. F. Ferramentas básicas da qualidade. **Revista Ciência da Informação**. v. 22, n. 2, p. 152-161, 1993. Disponível em: <<http://revista.ibict.br/ciinf/article/view/502/502>>. Acesso em: 18 set. 2016.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2011.

MARQUES, A. P. **Eficiência energética e vida útil de transformadores de distribuição imersos em óleo mineral isolante**. 182 F. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e da Computação) – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2004.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Globo, 1991.

MARTINS, D. L. **Estudo de caso na automação, proteção e supervisão de uma subestação de classe 69kV**. 93 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

MOURA, C. **Análise de Modos e Efeitos de Falha Potencial (FMEA)**: manual de referência (SAE J-1739). São Paulo: IQA, 2000. Disponível em: <<http://www.estgv.ipv.pt/PaginasPessoais/amario/Unidades%20Curriculares/Inova%C3>>. Acesso em: 20 ago. 2018.

PALADY, P. **FMEA: análise dos modos de falha e efeitos**. 5. ed. São Paulo: IMAM, 1997.

PEDROSA, B. M. M. **Análise dos modos de falha e seus efeitos (FMEA) aplicada a um secador industrial**. 98 f. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2014.

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.

RELIASOFT CORPORATION. **Applications and Benefits of FMEA and Xfmea**. Retrieved from ReliaSoft Corporation for Reliability Software, Training and Consulting Services. 2014. Disponível em: <<http://www.reliasoft.com/xfmea/benefits.htm>>. Acesso em: 20 abril 2018.

SÁ, A. L. C. R.; NEPOMUCENO, P. R. Avaliação do grau de polimerização antes e após a secagem de transformadores em fábrica. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E

TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Anais do Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica**, Belém, 1997. p. 1-6.

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

SANTOS, A. C. **Análise dos modos de falhas no desenvolvimento de novos produtos de SVA: uma abordagem para a indústria de telecomunicações**. 115 f. 2011. Dissertação (Mestrado em Marketing) – Faculdade de Economia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2011.

SARDINHA, G. P., CLARO, F. A.; PEREIRA, R. L. Uso combinado do AHP e do FMEA para análise de riscos em gerenciamento de projetos. In: SEGET – SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA. **Anais do SEGeT – Simpósio de excelência em gestão e tecnologia**. Resende, 2009. p. 1-13.

SCARDAZZI, A. **Ferramentas para o monitoramento da vida útil de transformadores**. São Paulo: Siemens, 2007. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2007/arquivos/s1002.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2014.  
SIQUEIRA, I. P. **Manutenção Centrada na Confiabilidade: Manual de Implementação**. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2005.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; ROBERT, J. **Administração da produção**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 2009.

SMITH, M. T. **History of the FMEA**. 2014. Disponível em: <<http://elsmar.com/FMEA/sld011.htm>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

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,

Porto, 2014.

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**. 102 f. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Escola de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal de Goiás, Goiás, 2008.

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

TEOH, P.; CASE, K. Failure Modes and Effects Analysis through Knowledge Modelling. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 153-154, n. 1-3, p. 253-260, 2004.

TOLEDO, J. C.; AMARAL, D. C. Apostila (texto básico) sobre FMEA. **GEPEQ – grupo de estudos e pesquisa em qualidade**. São Carlos: UFSCar. 2006. Disponível em: <[www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf](http://www.gepeq.dep.ufscar.br/arquivos/FMEA-APOSTILA.pdf)>. Acesso em: 10 jul. 2018.

VASQUES, C. M. R. Medição de transitórios eletromagnéticos oriundos de manobras controladas em três autotransformadores do banco AT07 (765/345 kV), da SE Tijuco Preto, em Mogi das Cruzes – SP. In: **Relatório Técnico CEPEL**. DLE-9401/11, 2011.

WEG. **Transformadores de potência pequeno (até 50.000 kVA)**. Disponível em: <[https://www.weg.net/catalog/weg/CA/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-a-%C3%93leo/3-001-a-50-000-kVA/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-Pequeno-%28at%C3%A9-50-000-kVA%29/p/MKT\\_WTD\\_SMALL\\_POWER\\_TRANSFORMER\\_UP\\_TO\\_50000KVA](https://www.weg.net/catalog/weg/CA/pt/Gera%C3%A7%C3%A3o%2C-Transmiss%C3%A3o-e-Distribui%C3%A7%C3%A3o/Transformadores-e-Reatores-a-%C3%93leo/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-a-%C3%93leo/3-001-a-50-000-kVA/Transformadores-de-Pot%C3%Aancia-Pequeno-%28at%C3%A9-50-000-kVA%29/p/MKT_WTD_SMALL_POWER_TRANSFORMER_UP_TO_50000KVA)>. Acesso em: 01 junl 2018.

WERKEMA, M. C. C. **As ferramentas da qualidade no gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1995.



**APÊNDICE**

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência.

Sistema de Proteção – Transformador de Potência													
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)						
						Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas					
						1	Relé de gás (Buchholz)	Falha no Relé de gás	Baixo isolamento de contato no relé	Contaminação por umidade, oxigênio e outros poluentes (animais/insetos)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.		
										Vibração excessiva na tubulação que interliga o tanque principal ao auxiliar			
										Falha na solda da bóia			
Bóia furada pelo parafuso de fixação													
Incompatibilidade do material da bóia maciça com óleo													
Afundamento da bóia (maciça)	Quebra do eixo de sustentação da bóia	Penetração de óleo isolante na bóia (oca)											

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência							
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)
						Detecção (D)	NPR
1	Relé de gás (Buchholz)	Falha no Relé de gás	Afundamento da bóia (oca)	Atuação indevida do contato da ampola	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.		
			Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética	Vibração mecânica no relé			
			Baixo isolamento das régua terminais e fiação do relé	Curto-circuito no sistema elétrico (externo ao transformador)			
			Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação	Fluxo deslocamento e óleo			
				Degradação material isolante			
				Contaminação por umidade			
				Utilização de emendas na fiação e régua intermediárias			
				Defeito de fabricação (erro de calibração)			



APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência										
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas
						2	Relé indicador da temperatura do óleo isolante	Falha no Relé indicador da temperatura do óleo isolante	<p>Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé</p> <p>Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética</p>	
3	Relé indicador da temperatura do enrolamento	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	<p>Baixo isolamento de contato no relé</p> <p>Atuação indevida por impacto</p>	<p>Defeito de fabricação (erro de calibração)</p> <p>Desajuste durante transporte/montagem do transformador</p> <p>Penetração de umidade</p> <p>Penetração animais/insetos</p> <p>Impacto da porta do armário no relé</p> <p>Desprendimento do relé</p>						

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência										
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas
						3	Relé indicador da temperatura do enrolamento	Falha no Relé indicador da temperatura do enrolamento	<p>Baixo isolamento das réguas terminais e fiação do relé</p> <p>Atuação indevida por compatibilidade eletromagnética</p> <p>Atuação indevida por erro nos ajustes de atuação</p>	
4	Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Falha na Válvula de alívio de pressão do tanque principal	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	<p>Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)</p> <p>Vibração</p>						

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência									
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Ações recomendadas			
						NPR	Deteção (D)	Ocorrência (O)	Severidade (S)
5	Dispositivo impedidor de manobra do CDST (Comutador de Derivações sem Tensão)	Falha no Dispositivo impedidor de manobra do CDST	Atuação indevida por degradação do isolamento entre os contatos da microchave	Contaminação por umidade e outros poluentes (poeira, chuva, animais/insetos)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.				
				Curto-circuito dos circuitos auxiliares de alimentação de ventiladores, das motobombas, dos mecanismos de acionamento do comutador de tape, da resistência de aquecimento dos armários					
6	Relé de carcaça	Falha no Relé de carcaça	Atuação indevida por curto-circuito	Quebra do dispositivo de disparo	Falha no mecanismo de acionamento motorizado				
				Quebra e/ou folga das engrenagens					
7	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no mecanismo de acionamento motorizado	Falha na chave auxiliar/contatores/disjuntores					

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência										
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas
7	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no mecanismo de acionamento motorizado	Umidade excessiva nos armários (corros)	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.					
				Solda fria conexão elétrica						
				Falha rolamento						
				Falha rolamento						
				Desacoplamento das hastes e/ou caixa transmissão						
				Alinhamento incorreto hastes e/ou caixa						
				Falta de folga longitudinal para dilatação das hastes						
				Lubrificação deficiente na caixa de transmissão						
				Conexões elétricas folgadas sem travamento						
				Reator e/ou Resistor transição aberto						
Reator e/ou Resistor transição aquecido										





APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência										
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas
						7	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no seletor e pré-seletor	

APÊNDICE A – FMEA: Sistema de Proteção do Transformador de Potência (Continuação).

Sistema de Proteção – Transformador de Potência										
ID	Componente	Falha	Modo de falha	Causa	Efeito	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	NPR	Ações recomendadas
7	Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha nos Comutadores de Derivações em Carga (CDC)	Falha no filtro absorvente	Deficiência na drenagem do ar após montagem e/ou manutenção	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.					
				Entrada de ar						
8	Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falhas em Comutadores de Derivações sem Tensão (CDST)	Falha na redução da superfície de contato	Deformação nas hastes isolantes	Falha no transformador, desligamento indevido do transformador e/ou degradação do sistema.					
				Folgas excessivas nas hastes de transmissão						
				Fadiga molas contatos						
			Desenergização do transformador	Operacional						