

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KARINE ANDRESSA ASSMANN

TESTES E ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA TENSÃO

PATO BRANCO

2022

KARINE ANDRESSA ASSMANN

TESTES E ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA TENSÃO

Electrical testes and tests in medium voltage substations

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: José Paulo de Barros Neto

PATO BRANCO

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KARINE ANDRESSA ASSMANN

TESTES E ENSAIOS ELÉTRICOS EM SUBESTAÇÕES DE MÉDIA TENSÃO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 30 de novembro de 2022

José Paulo de Barros Neto
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ana Cristina Alves Silveira Lima
Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Osis Eduardo Silva Leal
Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

Dedico este trabalho em memória do meu Ex-Orientador Cesar Augusto Portolann e à minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Lucia e Leonel Assmann, aos meus irmãos Aline e André Assmann, ao meu orientador José Paulo de Barros Neto, a todos os meus amigos e em especial, ao meu ex-orientador Cesar Augusto Portolann (*in memoriam*).

Todos vocês foram minha força, meu ânimo e minha resiliência para terminar essa fase da minha vida.

Obrigada por tudo.

A persistência é o caminho do êxito
(CHAPLIN, Charles, 1997).

RESUMO

Subestações de energia são definidas como um conjunto de instalações elétricas de média ou alta tensão que integram os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas. Seu funcionamento adequado requer a realização de testes e ensaios que indicam a necessidade de manutenções, o que por sua vez exigem uma adequada organização e conhecimento dos equipamentos de uma subestação de energia. Deste modo, objetivou-se neste trabalho elaborar uma revisão de literatura sobre os principais componentes de uma subestação de média tensão e os testes e ensaios básicos a serem realizados, visando reduzir a ocorrência de falhas e a necessidade de manutenções corretivas. Os principais equipamentos estudados em subestações de até 13,8 KV serão os disjuntores, as chaves seccionadoras, os transformadores para instrumentos, os relés de proteção de sobrecorrente, os para-raios, os isoladores, as buchas, o banco de bateria *no-break* e a malha de terra. Cada um destes equipamentos necessita ser submetido constantemente a testes e ensaios, a exemplo da medição de resistência de contato de isolamento. Constatou-se neste trabalho que a realização de manutenções em subestações de energia elétrica, especialmente as preditivas, é a principal forma de evitar falhas de operação e de reduzir custos e que a manutenção de subestações de energia elétrica deve ser realizada seguindo uma série de normas técnicas que garantam a segurança dos funcionários.

Palavras-chave: manutenção de subestações; energia elétrica; instrumentação.

ABSTRACT

Power substations are defined as a set of medium or high voltage electrical installations that integrate equipment, conductors and accessories, for the protection, measurement, maneuver and transformation of electrical quantities. Its proper operation requires the performance of tests and trials that indicate the need for maintenance, which in turn requires proper organization and knowledge of the equipment in a power substation. Thus, the objective of this study was to prepare a literature review on the main components of a medium voltage substation and the basic tests and trials to be performed in order to reduce the occurrence of failures and the need for corrective maintenance. The main equipment studied in substations up to 13.8 KV will be circuit breakers, disconnecting switches, instrument transformers, overcurrent protection relays, lightning arresters, insulators, bushings, the no-break battery bank and the grounding grid. Each of these pieces of equipment needs to be constantly submitted to tests and trials, such as the measurement of insulation contact resistance. It was found in this work that carrying out maintenance in electric power substations, especially predictive maintenance, is the main way to avoid operational failures and reduce costs, and that the maintenance of electric power substations should be carried out following a series of technical standards that ensure the safety of employees.

Keywords: substation maintenance; electrical energy; instrumentation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - As dimensões curriculares de pré-escolar.....	17
Figura 2 - Subestação de transformação abaixadora.....	18
Figura 3 – Subestação desabrigada.....	19
Figura 4 – Subestação abrigada.....	19
Figura 5 – Disjuntor utilizado em subestações.....	25
Figura 6 – Disjuntor utilizado em subestações.....	26
Figura 7 – D Microhmímetro utilizado em subestações para medição de resistência de isolamento.....	28
Figura 8 – Esquema de ligação para medição da resistência de contato do polo fechado de um disjuntor.....	29
Figura 9 – Chave seccionadora utilizada em subestações.....	33
Figura 10 – Transformador monofásico e trifásico.....	33
Figura 11 – Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC.....	36
Figura 12 – Transformadores do tipo TC.....	40
Figura 13 – Transformadores TC de média tensão.....	41
Figura 14 – Transformadores de potencial 15 Kv para uso abrigado.....	41
Figura 15 – Transformadores de potencial 15 Kv para uso desabrigado.....	41
Figura 16 - Correntes e representação da orientação do fluxo magnético na saturação simétrica.....	43
Figura 17 - Forma de onda de uma corrente assimétrica.....	44
Figura 18 - Circuito elétrico do ensaio de saturação em TC.....	44
Figura 19 - Circuito elétrico do ensaio de saturação em TC.....	45
Figura 20 – Para-raios de carboneto de silício.....	48
Figura 21 – Para-raios de óxido de zinco.....	49
Figura 22 – Isoladores utilizados em subestações.....	50
Figura 23 - Buchas de passagem utilizadas em subestações.....	51
Figura 24 – Painel de um <i>no-break</i> utilizado em subestações.....	53
Figura 25 – Esquema de construção de malha de terra em uma subestação.....	54
Figura 26 - Equipamento para medição de Resistência de Terra – Megger.....	55
Figura 27 - Método da queda de potencial.....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tolerância para ensaio de relação de transformação	40
Tabela 2 - Correntes de pick-up.....	46
Tabela 3 - Limiares empregados na avaliação do estado da isolação de buchas de alta tensão	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	15
2.1	Geral	15
2.2	Específicos	15
3	REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1	Subestações	16
3.1.1	Tipos de subestações	16
3.1.2	Manutenção.....	20
<u>3.1.2.1</u>	<u>Manutenção preditiva</u>	<u>21</u>
<u>3.1.2.2</u>	<u>Manutenção corretiva</u>	<u>22</u>
<u>3.1.2.3</u>	<u>Manutenção preditiva</u>	<u>22</u>
3.2	Principais equipamentos em subestações	23
3.3	Instrumentos, dispositivos e técnicas para testes, ensaios e manutenção geral de subestações separados por equipamentos	24
3.3.1	Disjuntores	24
<u>3.3.1.1</u>	<u>Medição de resistência de contato</u>	<u>27</u>
3.3.1.1.1	<i>Etapa 1 – verificação do equipamento de teste</i>	28
3.3.1.1.2	<i>Etapa 2 – pré-ensaio</i>	28
3.3.1.1.3	<i>Etapa 3 – ensaio</i>	29
3.3.1.1.4	<i>Etapa 4 – pós-ensaio</i>	29
3.3.1.1.5	<i>Análise dos resultados</i>	29
<u>3.3.1.2</u>	<u>Verificação de simultaneidade de fechamento e abertura de contatos</u> ..	<u>30</u>
3.3.1.2.1	<i>Etapa 1 – verificação do equipamento de teste</i>	31
3.3.1.2.2	<i>Etapa 2 – pré-ensaio</i>	31
3.3.1.2.3	<i>Etapa 3 – ensaio</i>	32
3.3.1.2.4	<i>Etapa 4 – pós-ensaio</i>	32
3.3.1.2.5	<i>Análise dos resultados</i>	32
3.3.2	Chaves seccionadoras.....	32
<u>3.3.2.1</u>	<u>Medição de resistência de contato de isolamento</u>	<u>33</u>
3.3.3	Transformadores de potência.....	33
<u>3.3.3.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>34</u>
<u>3.3.3.2</u>	<u>Análise do óleo isolante/refrigerante</u>	<u>37</u>
<u>3.3.3.3</u>	<u>Verificação da relação de transformação</u>	<u>38</u>

3.3.4	Transformadores para instrumentos	40
<u>3.3.4.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>42</u>
<u>3.3.4.2</u>	<u>Saturação</u>	<u>43</u>
3.3.5	Relés de proteção de sobrecorrente e outros	45
<u>3.3.5.1</u>	<u>Aferição e calibração</u>	<u>46</u>
3.3.6	Para-raios	47
<u>3.3.6.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>50</u>
3.3.7	Isoladores	50
<u>3.3.7.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>50</u>
3.3.8	Buchas	50
<u>3.3.8.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>51</u>
<u>3.3.8.2</u>	<u>Determinação da temperatura e umidade</u>	<u>51</u>
3.3.9	Banco de baterias/ <i>no-break</i>	52
<u>3.3.9.1</u>	<u>Medição de resistência de isolamento</u>	<u>53</u>
3.3.10	Outros equipamentos e testes	54
<u>3.3.10.1</u>	<u>Malha de terra</u>	<u>54</u>
<u>3.3.10.1.1</u>	<u><i>Método da Queda de Potencial</i></u>	<u>55</u>
3.4	Aspectos de segurança na manutenção e operação em subestações	56
3.5	Normas de subestações de energia elétrica	58
3.6	Manutenção de subestações de energia elétrica	60
3.7	Ensaio e testes em subestações	61
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	64

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica começou a ser introduzida no cotidiano da humanidade no final do século XIX, e ano após ano a sua utilização cresceu, e com isso novos produtos e tecnologias foram desenvolvidos. Assim, de acordo com Muzy (2012), a energia elétrica é diretamente proporcional ao aumento populacional e econômico do planeta.

No início dessa revolução tecnológica, a energia elétrica era produzida somente próximo dos locais de consumo, mas com o passar do tempo e com o avanço do desenvolvimento das cidades, constatou-se o aumento da dependência de eletricidade, o que provocou a necessidade da ampliação da capacidade de produção das usinas. Por consequência, a construção de usinas de grande porte cada vez mais afastadas dos locais de consumo final, acabaram por criar uma nova demanda, uma vez que se observou a primordialidade da criação de sistemas de redução de perdas de transmissão e de adequação da compatibilidade da energia com o consumidor final. Tal problema foi solucionado através da construção de instalações elétricas com a função de rebaixar a tensão fornecida, o que deu origem ao que se conhece como subestações (BARROS; GEDRA, 2011).

Neste contexto, as questões acerca de estudos que buscam eficiência no Sistema Elétrico de Potência (SEP) vem ganhando destaque tanto no cenário nacional quanto no global. Neste contexto, sabe-se que o SEP nada mais é que o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinadas à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica e que é regulamentada por meio da Portaria nº 3.214 de 08 de junho de 1978, que dispõe do conjunto destas instalações de acordo com as normas definidas pela Agência Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e através das Normas Brasileiras Regulamentadoras (NBR) (SILVA, 2016).

Dentro do SEP, as subestações de energia (SEs) são as estruturas responsáveis por controlar e direcionar o fluxo de potência, modificar grandezas e alterar grandezas e atuar como ponto de entrega de energia para os consumidores finais (COSTA, 2018). Deste modo, as subestações tem dois papéis fundamentais, um deles é processar a energia elétrica de forma a alterar o nível de tensão em seu barramento e o outro é proporcionar conexões adequadas para as linhas ou alimentadores interconectados no mesmo. Para manter este sistema ligado de forma eficiente, é de suma importância que os equipamentos, como por exemplo os

disjuntores e as chaves seccionadoras passem por manutenções adequadas para que se garanta a qualidade e confiança do serviço ofertado pela subestação. Assim, pode-se entender como manutenção uma combinação de ações técnicas e administrativas, que atuam por meio de processos diretos ou indiretos nos equipamentos, que incluem as de supervisão, cuja finalidade é manter ou recolocar um item no estado em que possa desempenhar sua função (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 1994, p.6).

De acordo com Barros e Greda (2009) uma empresa que trabalha com subestações ou em qualquer ramo que emprega energia elétrica em sua atividade produtiva, sabe que o capital investido em equipamentos e máquinas é de grande valor e, por conseguinte, é de extremo interesse que estes equipamentos e máquinas tenham uma produção satisfatória principalmente no que se refere, ao tempo de duração de funcionamento e eficiência destes dispositivos. Desta maneira, o tempo perdido causado por problemas imprevistos e defeitos de máquinas e equipamentos, é reduzido ao mínimo exigido para reparos, através da aplicação de um programa de manutenção tanto corretiva, preventiva e preditiva.

Para exemplificar melhor e justificar a importância de uma manutenção adequada em subestações, toma-se como exemplo a falha ou quebra imprevista de um transformador de potencial. Quando acontece uma falha imprevista, para realizar a manutenção corretiva deste equipamento pode levar dias, sendo que se tivesse realizado uma manutenção preventiva adequada, o tempo de parada de funcionamento deste equipamento, seria muito menor.

Além de ser um atrativo financeiro e operacional, a manutenção correta em subestações pode diminuir a taxa de acidentes no setor elétrico referentes as falhas dos equipamentos. Neste aspecto, Silva (2016) afirma que dados da Fundação Comitê de Gestão Empresarial (FUNCOGE) demonstram que entre os anos de 2004 e 2013, foram registrados no Brasil 729 acidentes de trabalho fatais no sistema de geração, transmissão e distribuição de energia, onde dentre estes, 601 ocorreram com trabalhadores terceirizados e 128 com trabalhadores próprios.

De acordo com McDonald (2007), as subestações são divididas em subestações de geração, transmissão e distribuição. A quantidade de subestações operando no Brasil, de acordo com cada divisão, pode ser analisada a seguir: 576 subestações de geração, 5775 subestações de distribuição, e 4905 em subestações de geração, totalizando 11.256 unidades (ANEEL, 2022).

A grande quantidade de subestações de energia existentes no Brasil demonstra a dimensão do setor elétrico do país. Assim, considerando que o número de acidentes relacionados ao setor elétrico no país segundo Martinho (2022), foi de em média e 1585 acidentes que resultaram em 761 mortes no ano de 2021, atesta-se que realizar um estudo sobre os tipos de manutenções, sendo elas manutenção preventiva, preditiva e até mesmo corretiva, pode mostrar-se como uma ferramenta de prevenção e de diminuição destas quantidades de acidentes.

É fundamental frisar que este trabalho não tem a pretensão de ser um manual ou roteiro para ser usado em manutenções de subestações, mas propõe uma leitura e uma revisão literária básica, cujo objetivo principal será ampliar a base de conhecimento para além dos limites das ementas vistas no curso de engenharia elétrica, até porque a quantidade de equipamentos presentes em uma subestação de energia é muito grande e o estudo de somente um dos dispositivos já daria um trabalho de conclusão de curso.

Em resumo, este estudo justifica-se pela necessidade de se adquirir conhecimento sobre a função dos equipamentos em subestações, sendo eles disjuntores, as chaves seccionadoras, os transformadores para instrumentos, os relés de proteção de sobrecorrente, os para-raios, os isoladores, as buchas, o banco de bateria *no-break* e a malha de terra, como também conhecer os testes e ensaios elétricos nos mesmos, com finalidade de reduzir a ocorrência de manutenções corretivas.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Elaborar uma revisão de literatura sobre os principais componentes, sendo eles os disjuntores, as chaves seccionadoras, os transformadores para instrumentos, os relés de proteção de sobrecorrente, os para-raios, os isoladores, as buchas, o banco de bateria *no-break* e a malha de terra de uma subestação, como também os testes e ensaios a serem realizados nos mesmos, visando reduzir a ocorrência de falhas e a necessidade de manutenções corretivas.

2.2 Específicos

-Elaborar uma revisão de literatura sobre as características dos principais tipos de subestações;

-Elaborar uma revisão de literatura sobre os principais tipos de manutenções que podem ser realizadas em subestações;

-Elaborar uma revisão de literatura sobre os principais componentes elétricos de subestações;

-Elaborar uma revisão de literatura sobre os principais testes e ensaios que precisam ser realizados nos componentes de subestações para evitar a ocorrência de falhas e reduzir a necessidade de manutenções corretivas;

-Elaborar uma revisão de literatura sobre os principais problemas decorrentes da falta de realização de ensaios e testes nos componentes de subestações.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Subestações

De acordo com Duailibe (1999) subestação (SE) é definida como um conjunto de equipamentos de manobra, transformação e de compensação de reativos, que possui dispositivos de proteção apropriados para detectar e isolar os diversos tipos de faltas que advém no sistema, sem prejudicar o mesmo. Já para Muzy (2012), as SE são explicadas como um conjunto de máquinas industriais interligadas entre si com os objetivos de controlar o fluxo de potência, modificar tensões e alterar a natureza da corrente elétrica assim como garantir a proteção do sistema elétrico. Por outro lado, a ENEL (2022) define estas estruturas como um conjunto de instalações elétricas de média ou alta tensão que integram os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas.

No que se refere as subestações, sabe-se que nestas existe a interconexão de vários aparatos elétricos de alta e média tensão que são utilizados para manobra, a exemplo dos disjuntores e das chaves seccionadoras. Além disso, fazem parte desta estrutura os dispositivos para interconexão ou barramento, os de transformação e transdução (transformadores de força, corrente e de potencial), bem como os elementos de regulação e compensação (reatores e capacitores) e os elementos de proteção, onde o sistema vem agregado de sensores, atuadores, relés analógicos ou digitais, etc. A junção de todos estes equipamentos tem como finalidade direcionar, controlar e monitorar o fluxo de energia num sistema elétrico de potência como também garantir a segurança de sua operação através de dispositivos que fazem a proteção, monitoramento e registro de eventos.

Portanto, basicamente uma SE é um conjunto de máquinas, dispositivos elétricos e circuitos cuja função é modificar os níveis de tensão e corrente, contendo elementos de proteção e controle, para assim permitir a distribuição de energia elétrica a sistemas de linhas de transmissão variados.

3.1.1 Tipos de subestações

Segundo Leão (2009) e Muzy (2012) os tipos de subestações podem ser classificados de acordo com sua função, nível de tensão, tipo de instalação e forma de operação.

No que tange a função das subestações, estas podem ser subdivididas em SE de manobra, SE de transformação, SE de distribuição, SE de regulação de tensão e SE conversoras (LEÃO, 2009; MUSY, 2012). As subestações de manobra, que pode ser visualizada na figura 1, são aquelas que interligam os circuitos de suprimentos sob o mesmo nível de tensão, possibilitando sua multiplicação, sendo adotadas ainda para possibilitar o seccionamento de circuitos, permitindo a energização de trechos sucessivos de menores comprimentos (MUSY, 2012).

Figura 1 - As dimensões curriculares de pré-escolar



Fonte: Energes (2022)

As subestações de transformação, por sua vez, podem ser divididas em elevadoras e abaixadoras. As SE de transformação elevadoras, de modo geral são localizadas na saída de usinas geradoras e tem como finalidade elevar os níveis de tensão e de subtransmissão, visando diminuir a corrente e, conseqüentemente, a espessura dos condutores e as perdas. Esta elevação de nível tensão é utilizada para facilitar o transporte da energia, diminuindo as perdas do sistema e melhorando o processo de isolamento dos condutores. As SE de transformação abaixadoras, por outro lado, são construídas nas periferias dos centros consumidores e sua função é diminuir os níveis de tensão, para que se evite inconvenientes para a população, como por exemplo rádio interferência, surgimento de campos magnéticos intensos ou ainda, de faixas de servidão muito grandes (LEÃO, 2009; MUSY, 2012). Na figura 2, vemos alguns elementos que fazem parte de uma subestação de transformação abaixadora, onde aparecem dois tipos de disjuntor de potência.

Figura 2 - Subestação de transformação abaixadora

Fonte: Muzy (2012)

As subestações de distribuição têm por finalidade conduzir a energia diretamente ao consumidor e para isso, recebe a eletricidade das linhas de subtransmissão e as transporta para as redes de distribuição, geralmente com abaixamento de tensão (MUSY, 2012). Em contrapartida, as SE de regulação de tensão são aquelas cuja finalidade é regular a tensão elétrica, adequando a mesma para a serventia local. Por fim, as SE conversoras são, de modo geral, associadas a sistemas e transmissão em corrente contínua e podem ser conversoras, retificadoras ou inversoras (LEÃO, 2009).

Quando se trata do nível de tensão das subestações, as tensões mais comuns utilizadas no país são 13,8kV, 23,1kV, 34,5kV, 69kV, 88kV, 345kV, 440kV, 500kV e 750kV. A ANEEL (2021) divide as SEs da seguinte forma: com valores acima de 230kV, extra-alta tensão, tensões nominais entre 69kV e 230kV são subestações de alta tensão, de 2.3kV até 69kV são chamadas de SEs média tensão.

Em relação ao tipo de instalação das subestações, estas são categorizadas em desabrigadas, abrigadas ou blindadas (LEÃO, 2009). As SE desabrigadas (Figura 3) são aquelas construídas em locais sujeitos a intempéries e que necessitam emprego de aparelhos e máquinas que suportem condições atmosféricas, que promovem desgaste nos materiais componentes, onde, pelos motivos citados, a manutenção será solicitada em menor tempo devido ao efeito danoso do clima, aos equipamentos (MUSY, 2012).

Figura 3 – Subestação desabrigada

Fonte: Muzy (2012)

Ao contrário das SE desabrigadas, as subestações abrigadas demonstradas na figura 4, são aquelas montadas em locais abrigados, de modo que os elementos elétricos são instalados no interior de construções como edificações ou câmaras subterrâneas e por isso, não estão sujeitos às intempéries. Se estes abrigos forem isolados em óleo, ar comprimido ou hexafluoreto de enxofre (SF6), diz-se que esta SE é blindada (LEÃO, 2009; MUSY, 2012). Estas subestações estão tendo preferência pelas concessionárias pois para homologação junto à concessionária, é necessário que sejam atendidos inúmeros padrões técnicos nacionais e internacionais. A partir da homologação, o tempo de análise de projeto é enormemente reduzido.

Figura 4 – Subestação abrigada

Fonte: Sulltec Geradores (2022)

Por fim, as subestações quanto a forma de operação são subdivididas em SE com operador, em que há um operador treinado que faz uso de computadores para supervisão e operação; SE semi-automática, possui computadores locais ou

intertravamentos eletromecânicos com função de impedir operações indesejadas por parte do operador local. Já as SE automatizada, são supervisionadas a distância por meio de computadores e software supervisor SCADA (LEÃO, 2009).

3.1.2 Manutenção

A Primeira Revolução Industrial que se iniciou por volta de 1750, caracterizou-se pela introdução de máquinas a vapor e pela mecanização das indústrias de todo mundo, de modo que a primeira indústria que teve seus processos mecanizados foi uma tecelagem na Ilhas Britânicas (BARBOZA, 2018, p.84).

Com o avanço da automatização das indústrias provocadas pela Primeira Revolução Industrial, tornou-se necessário a adoção de práticas que garantissem a manutenção destes equipamentos. Por isso, a história da manutenção teve seus primórdios nessa época, onde os reparos necessários nas máquinas eram realizados pelos próprios operários da produção. Este tipo de manutenção ficou caracterizada como uma manutenção improvisada não organizada, conhecida como “quebra-repara”, e mantiveram-se até princípios do século XX (BARBOZA, 2018).

Em meados de 1914, com a Primeira Guerra Mundial e a invenção de produção em série, as principais indústrias passaram a programar a produção em termos de valores mínimos a atingir e tiveram que criar grupos especializados em manutenção, de modo que os reparos fossem efetuados em boas condições técnicas e no mínimo intervalo de tempo possível. Deste modo, por volta de 1920 e 1930 iniciou-se o que se conhece como manutenção corretiva (BARBOZA, 2018).

Neste contexto, a palavra manutenção deriva do latim *manus tenete*, que significa “manter o que se tem” é entendida como o conjunto de cuidados e procedimentos técnicos que são necessários para o bom funcionamento e para o reparo de máquinas, equipamentos, peças, moldes e ferramentas. Assim, a manutenção não atua somente em máquinas que já estão em operação, mas age também na criação de projetos, uma vez que a disposição das peças, a acessibilidade dos conjuntos pelo mecânico e o dimensionamento das peças e componentes devem obedecer a critérios que facilitem as operações de manutenção futuras (ALMEIDA, 2022).

Ao referir-se à manutenção, sabe-se que existem três tipos principais que devem ser utilizados com diferentes finalidades: manutenção preventiva, manutenção corretiva e manutenção preditiva.

3.1.2.1 Manutenção preditiva

A manutenção preventiva é aquela executada em intervalos predeterminados ou de acordo com critérios pré-estabelecidos, que tem por objetivo reduzir a probabilidade de falha ou degradação do funcionamento de um item (SILVA NETO; LIMA, 2002).

Este tipo de manutenção tem como particularidade seguir uma programação preliminar de atividades sobre os dispositivos, atendendo a um tempo previamente definido, sendo realizada em intervalos periódicos. Essa inspeção periódica tem como finalidade fazer uma prevenção em relação aos defeitos que possam causar a interrupção das condições de operação (SOARES, 2013).

De acordo com Silva Neto e Lima (2002), para que se tenha um efetivo controle da manutenção preventiva, é necessário que se mantenha um rigoroso controle de todos os dispositivos com auxílio de fichas individuais, onde se faz o registro da inspeção mecânica ou elétrica e com base nestas informações, faz-se a programação de sua manutenção.

Esse tipo de manutenção quando a relacionamos ao trabalho feito em subestações, podemos dizer que é através de inspeções, ensaios e detecção nos equipamentos analisados dentro das SE, que é possível observar se os mesmos ainda validam com as especificações do fabricante, podendo, muitas vezes, ocorrer antecipação da falha, e é por esse motivo que é importante fazer um planejamento minucioso da manutenção preventiva, pois é com ele que se tem uma ideia de qual o melhor momento para executá-la. No planejamento deve ser estabelecida a periodicidade da manutenção, sempre obedecendo, quando fornecidos, os prazos indicados pelo fabricante e o tempo de vida dos equipamentos. A importância de cada equipamento também deve ser abordada.

No geral, as atividades executadas nas SE em relação a manutenção preventiva vão desde ensaios, ajustes, limpeza e inspeções até a substituição ou reparo de equipamentos. Todos esses procedimentos devem proporcionar o mínimo impacto ou mesmo a interrupção da condição normal de trabalho devido à manutenção preventiva, minimizando os custos causados pela parada (SOARES, 2013).

3.1.2.2 Manutenção corretiva

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT (1994), manutenção corretiva é aquela efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um dispositivo, item ou mecanismo em condições de executar uma função requerida. Em consonância, Soares (2013) e Almeida (2014) complementam dizendo que a manutenção corretiva é um conjunto de procedimentos que são executados a fim de atender imediatamente a produção, a máquina ou conjunto de dispositivos que parou ou apresentou defeito, onde a equipe de manutenção age imediatamente para restabelecer seu funcionamento o mais rápido possível.

A manutenção corretiva não é planejada e é executada após a ocorrência da falha, sem que haja uma preparação prévia e por isso. Esse tipo de manutenção em geral, possui um alto custo agregado, visto que a correção da falha vai depender diretamente da rápida atuação da mão de obra para a manutenção e da disponibilidade das peças em estoque necessárias ao reparo (SOARES, 2013).

Apesar do alto custo gerado pela necessidade da execução de manutenções corretivas, Silva Neto e Lima (2022) afirmam que é possível aplicar uma série de métodos que permitem a diminuição das consequências provocadas por esta atividade através de métodos como análise de modos de falhas, seus efeitos e suas causas; instalação de tecnologias mais confiáveis; utilização de métodos de diagnósticos de panes mais rápidos e busca de métodos de vigilância melhor adaptados aos pontos críticos.

Apesar de existirem meios de reduzir a necessidade de manutenções corretivas, sabe-se, no entanto, que as avarias e as paradas são inevitáveis mesmo que se tenha controle do processo. Por isso, é indispensável que se tenha equipes especializadas para a execução das reparações. Assim, existem quatro fatores principais a serem considerados, sendo eles: pessoal qualificado, equipamentos, peças de reposição e arquivos e registros das tarefas ou serviços executados (SILVA NETO; LIMA, 2022).

3.1.2.3 Manutenção preditiva

A manutenção preditiva é aquela que permite garantir uma qualidade de serviço desejada, com base na aplicação sistemática de técnicas de análise,

utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT, 1994).

Assim, este tipo de manutenção que é aplicado geralmente em grandes empresas e em uma fase mais evoluída do controle do processo. O nome é uma expressão norte-americana que define um tipo de manutenção condicional que permite reajustar os períodos ou previsões das operações de manutenção a efetuar. A partir disso estima-se a tendência evolutiva do funcionamento não adequado de determinado equipamento ou máquina e o tempo durante o qual é possível continuar a utilizá-lo antes da avaria (SILVA NETO; LIMA, 2022).

Através do uso da manutenção preditiva é possível elevar o intervalo entre os intervalos por quebras ou defeitos dos equipamentos, como é feita na manutenção corretiva, ou inspeções e reparos programados como é feito na manutenção preventiva. Com o monitoramento deste tipo de manutenção, deve-se analisar os resultados obtidos os quais indicarão se o equipamento continua exercendo normalmente sua função ou se apresenta perturbações significantes comparadas com resultados pontuados em atividade ideal, que possam indicar uma deterioração do equipamento (SOARES, 2013).

A manutenção preditiva exige em sua execução o uso de dispositivos adequados para o registro de vários fenômenos com o equipamento em funcionamento, tais como: vibração, temperatura, pressão, desempenho, garantindo que estes parâmetros sejam medidos em condições reais de operação (SOARES, 2013).

3.2 Principais equipamentos em subestações

Quando nos referimos a subestações de energia elétrica, sabemos que vários são os equipamentos necessários para o funcionamento adequado, tais quais: barramentos; linhas e alimentadores; equipamentos de disjunção (disjuntores, religadores, chaves); equipamentos de transformação (transformadores de potência, transformadores de instrumentos; transformador de potencial; transformador de corrente e transformador de serviço); equipamentos de proteção (relé primário, relé retaguarda, relé auxiliar, fusíveis, para-raios e malha de terra); equipamentos de compensação (reatores, capacitores, compensadores síncronos, compensadores estáticos).

A literatura que versa sobre essas manutenções é na maioria baseada em orientações técnicas dos fabricantes dos equipamentos. Os ensaios e testes constam nas normas nacionais e internacionais e serão referenciados oportunamente, em relação a cada equipamento citado.

3.3 Instrumentos, dispositivos e técnicas para testes, ensaios e manutenção geral de subestações separados por equipamentos

3.3.1 Disjuntores

Segundo Muzy (2012) e Niskier (2013) disjuntores são os equipamentos de proteção e manobra, que possuem a capacidade de conduzir ou interromper a corrente elétrica em condições normais ou em condições anormais. Este dispositivo é considerado como um dos principais equipamentos de segurança das subestações de energia elétrica, além de se mostrar como um dos mais eficientes dispositivos de manobra em uso nas redes elétricas.

Assim, entende-se popularmente o disjuntor como um elemento de proteção eletromecânico de ação eletromagnética usado em instalações elétricas, utilizado para ligar e desligar circuitos, que com esse princípio é geralmente utilizado na baixa tensão. Na prática, os disjuntores substituíram aos fusíveis que em caso de aumento da corrente elétrica acima de certo limite, queimavam e tinham que ser descartados, encarecendo a obra e prejudicando o sistema. Os disjuntores, ao contrário dos fusíveis, não são descartáveis, pois possuem a característica de apenas desarmarem-se quando a corrente excede seu limite, podendo ser reutilizados após serem novamente armados de forma manual (DANTAS; MINOTTI, 2021).

A atuação do disjuntor segue de acordo com os níveis da corrente elétrica que atravessa o sistema e na ocorrência de alguma alteração que resulte em sobrecarga ele se desarma e com isso interrompe o funcionamento de toda uma rede. Quando acontece um pico na corrente elétrica e ela ultrapassa o dimensionamento programado, ele se desarma e interrompe o fornecimento de energia para as cargas desse circuito (DANTAS; MINOTTI, 2021).

É importante ser colocado que as tecnologias de disparo ou desarme de um disjuntor são diretamente relacionadas ao nível de corrente de interrupção e também à classe de isolamento envolvidas. Um disjuntor de potência, para uso em subestações

de energia tem princípio de funcionamento totalmente diferente daqueles utilizados em baixas correntes.

Figura 5 – Disjuntor utilizado em subestações



Fonte: DREAMSTIME (2022)

No que diz respeito a manutenção de disjuntores, é necessário no primeiro momento, entender quais são os tipos de disjuntores existentes. Assim, de acordo com Muzy (2012), os tipos de disjuntores existentes são: a óleo, a ar comprimido, a SF6 e a vácuo. Cada tecnologia recebe o nome em função da forma ou elemento de extinção ou interrupção do arco elétrico no momento do chaveamento. Cada tipo tem sua complexidade de manutenção inerente ao processo envolvido.

Os disjuntores a óleo são divididos em disjuntores de grande volume de óleo e de pequeno volume de óleo. No caso dos disjuntores a grande volume, com menor capacidade, as fases ficam imersas em um único recipiente contendo óleo, que é usado tanto para a interrupção das correntes quanto para prover o isolamento. Já nos disjuntores de pequeno volume de óleo, como mostrado na figura 6, existe uma câmara de extinção com fluxo forçado sobre o arco, aumentando a eficiência do processo de interrupção da corrente, diminuindo drasticamente o volume de óleo do disjuntor (MUZY, 2012).

Figura 6 – Disjuntor utilizado em subestações



Fonte: ABB (2022)

Os disjuntores a ar comprimido, por outro lado, são aqueles que utilizam ar comprimido como meio de extinção de arco elétrico e na maioria das vezes para isolamento e acionamento dos contatos móveis. Esses disjuntores utilizam um princípio de extinção bastante simples. A partir de uma fonte de ar pressurizada, o método baseia-se em criar um fluxo de ar sobre o arco suficiente para resfriar a região entre os contatos ao mesmo tempo em que expulsa o gás ionizado que ali se encontra. Estão atualmente sendo colocados em desuso devido à falta de peças, também são muito barulhentos para serem utilizados em processos industriais (MUZY, 2012).

Os ensaios em disjuntores de alta tensão estão definidos na NBR 7102, onde alguns ensaios de rotina são citados abaixo. Os ensaios de tipo podem não ser exigidos, desde que o fabricante tenha o disjuntor homologado junto às concessionárias. Já os ensaios de recebimento e inspeção visual, devem ser feitos no local de instalação.

Os ensaios considerados de rotina são:

Ensaio de tensão suportável a seco, à frequência industrial no circuito principal; Ensaio de tensão aplicada nos circuitos de comando e auxiliar; Medição da resistência no circuito principal; Ensaio de operação mecânica; Ensaio nas buchas; Ensaio de vazamento (óleo, ar comprimido, gás); Ensaio de pressão (gás, ar comprimido); Ensaio dos ajustes mecânicos; Ensaio de operação mecânica; Ensaio dos tempos de operação tanto no fechamento como na abertura e ensaios de suportabilidade

dos componentes isolantes principais, à tensão de frequência industrial (MAMEDE FILHO, 2013).

3.3.1.1 Medição de resistência de contato

A medição de resistência de contato tem como objetivo determinar a resistência existente entre cada um dos polos superiores e inferiores de um disjuntor quando o mesmo estiver na posição fechado. Tal resultado, geralmente dado em micro ou miliohms sempre valores muito baixos, e permite determinar a condição de preservação dos contatos de potência que são responsáveis pela condução ou interrupção de grandes valores de correntes, já que a condição de operação sob carga, solicitações térmicas e a força mecânica disposta durante o trabalho realizado, provocam desgaste dos contatos (CIARLINI, 2022).

A realização do teste de resistência de contato é efetuada a partir da utilização de um equipamento chamado de microhmímetro. Como a resistência a ser medida é de baixo valor, é necessário para o funcionamento deste processo, que se injete um valor de corrente inversamente proporcional ao valor de resistência que se deseja medir (CIARLINI, 2022). Assim, ao se utilizar do princípio da lei de ohm, que diz que para um condutor metálico, a uma dada temperatura fixa, a razão entre a diferença de potencial entre os seus terminais e a intensidade de corrente que o atravessa é constante, o equipamento irá calcular a resistência (CIARLINI, 2022).

Na figura 6, é possível observar os principais componentes de um equipamento microhmímetro, sendo eles: 1 – botão tipo gangorra liga/desliga; 2 – botão “Start” para iniciar o ensaio; 3 – botão “Start” para interromper o ensaio; 4 – botão “Hold” para segurar o resultado no teste no display após interrupção de ensaio; 5 – botão de verificação de estado da bateria; 6 – conjunto de botões para seleção de escala de resistência que se deseja medir; 7 – display para visualização das informações de ensaio; 8 – terminal positivo de injeção de corrente; 9 – terminal positivo de medição de tensão; 10 – terminal negativo de medição de tensão; 11 – terminal negativo de injeção de corrente; 12 – conector para realização de conexão do equipamento com malha de aterramento; 13 – ponto de conexão para recarga da bateria do equipamento e 14 – controle analógico de injeção de corrente de 0 a 100% (CARLINI, 2022).

Figura 7 – D Microhmímetro utilizado em subestações para medição de resistência de isolamento



Fonte: Ciarlini (2022)

De acordo com Ciarlini (2022), a execução deste teste passa por quatro etapas principais, sendo elas: Etapa 1 – verificação do equipamento de teste; Etapa 2 – pré-ensaio; Etapa 3 – ensaio e Etapa 4 – pós-ensaio. A seguir, é possível verificar o passo a passo para a execução de cada etapa.

3.3.1.1.1 Etapa 1 – verificação do equipamento de teste

- Verificar o equipamento de teste onde o mesmo deve ser calibrado e certificado em laboratório;
- Execução de testes no equipamento microhmímetro e nos seus acessórios para validar sua integridade e condições para realização dos ensaios;

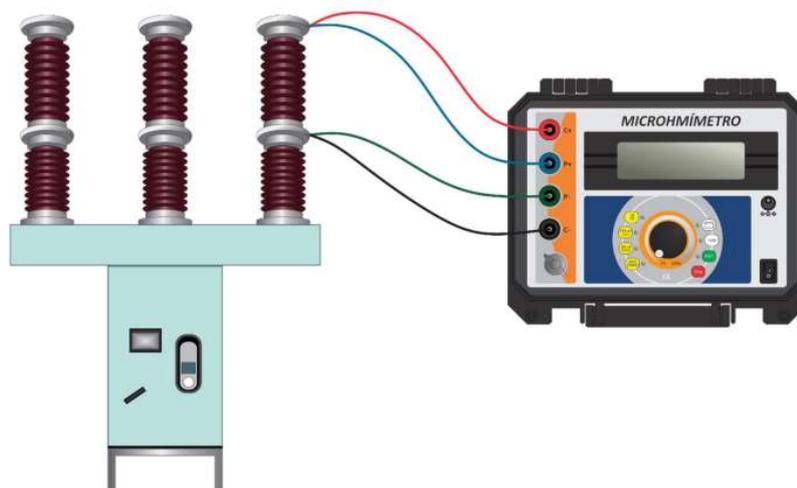
3.3.1.1.2 Etapa 2 – pré-ensaio

- Inspeção visual em busca de identificar possíveis situações impeditivas para os ensaios ou prosseguimento das atividades;
- Testes de operação manual do equipamento alvo do ensaio;
- Desconexão dos cabos e barramentos provenientes da alta tensão, com exceção dos cabos de aterramento;
- Identificação dos cabos condutores para evitar inversão na hora da montagem.

3.3.1.1.3 Etapa 3 – ensaio

- Montagem do teste de acordo com a Figura 6, para medição da resistência de contato do polo do disjuntor em estado de fechado;

Figura 8 – Esquema de ligação para medição da resistência de contato do polo fechado de um disjuntor



Fonte: Ciarlini (2022)

- Verificar a disposição dos cabos e partes metálicas não relacionadas ao ensaio;
- Para o ensaio de resistência de contato, a resistência de contato que deverá existir entre as garras do microhmímetro e as partes metálicas do disjuntor não serão relevantes e em nada irão impactar no ensaio;
- Iniciar os ensaios com valor de corrente zerado e ir incrementando o valor até próximo de 90% da escala máxima do microhmímetro, onde a leitura deverá estabilizar no valor de resistência medida;
- Encerrar o ensaio e tomar nota do valor medido;

3.3.1.1.4 Etapa 4 – pós-ensaio

- Realizar a montagem das conexões de cabos e barramentos para voltar a condição inicial de operação do equipamento.

3.3.1.1.5 Análise dos resultados

Após a obtenção dos valores, Ciarlini (2022) ressalta que é necessário que os mesmos passem por uma correção pelo fator de temperatura de referência, de acordo com a equação a seguir.

$$R_{W^{\circ}C} = \frac{R_{Z^{\circ}C} * (W^{\circ}C + 234,5)}{(Z^{\circ}C + 234,5)}$$

Onde:

$R_{W^{\circ}C}$ – resistência ôhmica do enrolamento na temperatura de referência;

$R_{Z^{\circ}C}$ – resistência ôhmica do enrolamento na temperatura de ensaio;

$W^{\circ}C$ - temperatura de referência;

$Z^{\circ}C$ – temperatura do ensaio.

Ainda de acordo com Ciarlini (2022), as normas de referência que dizem respeito aos disjuntores de alta tensão não estabelecem valores mínimos ou de referências de resistência de contato, uma vez que o perfil mecânico do contato varia. Assim, os critérios que podem ser utilizados são: teste de aceitação de fábrica (TAF), onde leva-se em consideração um relatório emitido pelo fabricante do equipamento para aprovação de conformidade; relatórios de manutenções anteriores, onde utiliza-se como referência o histórico de ensaios no equipamento e comparação direta, onde em situações onde se dispõem de mais de um equipamento para ensaio, comparando os resultados obtidos entre polos e entre equipamentos.

3.3.1.2 Verificação de simultaneidade de fechamento e abertura de contatos

A verificação de simultaneidade de fechamento e abertura de contatos pode ser realizado através de um teste conhecido como oscilografia (CIARLINI, 2022). De acordo com Pereira Junior *et al.* (2019), a utilização deste teste e a averiguação dos tempos associados ao funcionamento de um disjuntor é de vital importância, uma vez que a discrepância no tempo de fechamento dos três polos dos disjuntores pode provocar perdas de sincronismos no sistema elétrico ou em condições prejudiciais a motores trifásicos devido a criação de correntes de sequência negativa. Por outro lado, o atraso na abertura dos disjuntores, pode resultar em danos permanentes nos equipamentos sob falta.

Assim, o teste de oscilação é normalmente realizado em disjuntores utilizados em redes de média e alta tensão, uma vez que descreve os contatos do disjuntor com relação ao tempo. Nesta avaliação, identifica-se o tempo que transcorre entre o

comando de abertura ou fechamento e a efetiva abertura ou fechamento, além da simultaneidade de abertura e fechamento entre os polos do disjuntor (PEREIRA JUNIOR *et al.*, 2019; CIARLINI, 2022).

O teste de oscilografia é realizado com o auxílio de um equipamento chamado de oscilógrafo, que utiliza o princípio do circuito divisor de tensão para realizar leituras de mudança de estado aberto para fechado e de fechado para aberto dos polos do disjuntor. Além do oscilógrafo, é necessária uma fonte de tensão CC, caso o oscilógrafo não tenha uma fonte própria de tensão (CIARLINI, 2022).

Quando se refere as leituras de tempo a serem realizadas quando a operação de abertura e fechamento dos disjuntores, deve-se avaliar o tempo que cada um dos polos leva para realizar a operação desde o momento do acionamento da respectiva bobina. Por isso, deve-se extrair as seguintes informações:

- a) Tempo de abertura e/ou fechamento: tempo necessário desde o acionamento da bobina até o início de abertura/fechamento do primeiro polo;
- b) Discordância máxima entre polos: diferença de tempo entre o tempo de operação do polo mais rápido e do polo mais lento (CIARLINI, 2022).

A avaliação de oscilografia deve seguir quatro etapas básicas: Etapa 1 – verificação do equipamento de teste; Etapa 2 – pré-ensaio; Etapa 3 – ensaio e Etapa 4 – pós-ensaio. A seguir, é possível verificar o passo a passo para a execução de cada etapa.

3.3.1.2.1 Etapa 1 – verificação do equipamento de teste

- Calibração e certificação do oscilógrafo em laboratório válido;
- Devem se realizar testes no oscilógrafo e nos acessórios para verificação da integridade dos mesmos;

3.3.1.2.2 Etapa 2 – pré-ensaio

- Inspeção visual de identificação de possíveis impedimentos para a realização do ensaio;
- Testes de operação manual do equipamento;
- Desconectar todos os cabos e barramentos oriundos da alta tensão, com exceção de cabos de aterramento;

3.3.1.2.3 Etapa 3 – ensaio

- Montar o teste para realização das leituras do tempo de abertura e fechamento, de acordo com a Figura 6;
- Iniciar a captura de informações pelo oscilógrafo, realizar a operação correspondente no disjuntor e encerrar o modo de captura;
- Realizar a leitura em triplicata;
- Encerrar o ensaio e anotar os tempos medidos;

3.3.1.2.4 Etapa 4 – pós-ensaio

- Religar os cabos desconectados;

3.3.1.2.5 Análise dos resultados

Após a obtenção dos dados por meio do oscilógrafo, os valores podem ser comparados com duas referências principais, conforme descrito por Ciarlini (2022), sendo elas:

- a) Dados de placa – nos dados de informações dos disjuntores ou no manual destes, são indicadas as faixas de tempo de abertura e fechamento adequados do disjuntor;
- b) Tempo de meio período da rede – a diferença dos tempos de operação entre os polos não pode passar do tempo de meio período da rede.

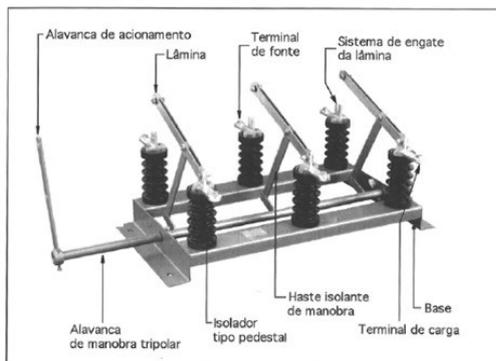
A constatação de tempos superiores aos valores de referências acima citados, pode provocar uma maior concentração da potência de curto circuito em uma das fases, o que provoca uma corrente de curto circuito superior a capacidade de interrupção do disjuntor, provocando danos permanentes ao mesmo (CIARLINI, 2022).

3.3.2 Chaves seccionadoras

Chaves seccionadoras (Figura 7) são dispositivos destinados a fechar, abrir ou transferir as ligações de um circuito em que o meio isolante é o ar. Assim, de acordo com a NBR 6935, seccionadores são “dispositivos mecânicos de manobra capaz de abrir e fechar um circuito elétrico quando uma corrente de intensidade desprezível é interrompida ou restabelecida, sendo também capaz de conduzir correntes sob

condições normais do circuito e durante um tempo especificado correntes sob condições anormais, como curto-circuito” (MUSY, 2012).

Figura 9 – Chave seccionadora utilizada em subestações



Fonte: Mamede (2005)

3.3.2.1 Medição de resistência de contato de isolamento

A medição de resistência de contato de isolamento de chaves seccionadoras deve ser realizada do mesmo modo que o disposto para os disjuntores.

3.3.3 Transformadores de potência

De acordo com Bechara (2010), transformadores de potência são equipamentos que possuem como premissa básica de funcionamento, a conversão de diferentes níveis de tensão entre a fonte de energia e a carga alimentada. Estes sistemas podem ser trifásicos ou monofásicos, dependendo de cada instalação (Figura 8).

Figura 10 – Transformador monofásico e trifásico



Fonte: Bechara (2010)

Estes sistemas são formados por estruturas como buchas de alta e baixa tensão, radiadores ou trocadores de calor, tanque principal, tanque de expansão, painéis de controle e outros dispositivos (BECHARA, 2010).

Em subestações, o principal tipo de transformador utilizado é o de transmissão, que interliga linhas e sistemas em diferentes níveis de tensão. Este tipo de transformador possui características de construção mais complexas no que tange o sistema de regulação de tensão e quantidade de enrolamentos, sendo composto por comutadores sob carga, geralmente de alta tensão, onde a mudança de *tap* é realizada durante o funcionamento normal do equipamento sem a necessidade de que se faça o seu desligamento (BECHARA, 2010).

No que se refere ao funcionamento de transformadores de potência, os principais componentes que merecem destaque em relação à ocorrência de falhas são as buchas e os comutadores. Neste aspecto, buchas são dispositivos dotados de pequenos tanques de expansão que permitem dilatações do volume interno de óleo, sem que ocorra a entrada de umidade ou gases presentes no ambiente, possuindo componentes com distâncias dielétricas críticas e volume de óleo relativamente pequeno. Já os comutadores, são dispositivos eletromecânicos utilizados para alterar os níveis de tensão e fluxo de potência em transformadores, por meio da adição ou subtração de espiras que compõem o enrolamento de regulação (BECHARA, 2010).

Assim, ainda de acordo com Bechara (2010), quando se trata da manutenção preventiva de transformadores, existem dois pontos que merecem atenção: a realização de análises do óleo isolante e de testes nos componentes que definem a necessidade de realização de interferências como tratamento do óleo, troca de componentes como juntas de vedação e contato de comutadores, dentre outros.

3.3.3.1 Medição de resistência de isolamento

A medição da resistência de isolamento é realizada visando identificar a dificuldade constatada para à passagem de corrente elétrica pelos materiais isolantes, de modo que seus valores são alterados dependendo da umidade e da presença de sujeira, que altera a capacidade do isolamento, da resistência total, das perdas superficiais e da temperatura do material, e por isso são bons indicativos da deterioração dos equipamentos elétricos (PAULINO, 2014).

Neste tipo de ensaio, aplica-se no isolamento uma tensão de corrente contínua, com valores entre 500 e 10.000 V e através de um instrumento denominado

megôhmetro, faz-se a leitura da resistência. A medida da resistência resultante neste ensaio é a soma da resistência interna do condutor (valor pequeno) acrescida da resistência de isolamento dividida em três componentes (subcorrentes) independentes, sendo eles: corrente de deslocamento ou corrente de carga capacitiva (IC), corrente de absorção (IA) e corrente de dispersão ou corrente de fuga por meio do dielétrico (IL) (PAULINO, 2014).

De acordo com Paulino (2014), para a realização do ensaio de resistência de isolamento deve-se seguir o passo-a-passo descrito a seguir:

- 1) Desenergizar o transformador;
- 2) Desconectar os cabos externos – os ensaios de resistência de isolamento devem ser executados com todos os cabos do transformador desconectados das buchas, inclusive o cabo da bucha neutro;
- 3) Em caso de impossibilidade de desconexão dos cabos, deve-se proceder a anotação detalhada do esquema de teste com respectiva descrição;
- 4) Curto-circuitar os terminais das buchas de um mesmo enrolamento para melhor distribuição do potencial;
- 5) O tanque do transformador deve ser aterrado;
- 6) Inspeccionar e limpar as buchas com pano seco ou embebido em álcool e anotar qualquer irregularidade;
- 7) Cuidar para que os cabos do megôhmetro não toquem em outras partes do equipamento, ou se toquem, evitando alterações na medida de resistência do isolamento;
- 8) Ajustar o megohmetro de acordo com as especificações do equipamento utilizado;
- 9) Nivelar-se o megohmetro nos casos de medidores com indicador de ponteiros;
- 10) Em megohmetros manuais é importante que se mantenha a rotação do cambito na especificidade pelo fabricante, para obtenção de tensão constante;
- 11) Deve-se observar cuidadosamente o ponteiro do megôhmetro quando em operação. Se ele apresenta oscilação excessiva é provável que haja mau contato, fugas intermitentes pela superfície do cabo de ligação ou influência de circuitos energizados nas proximidades;

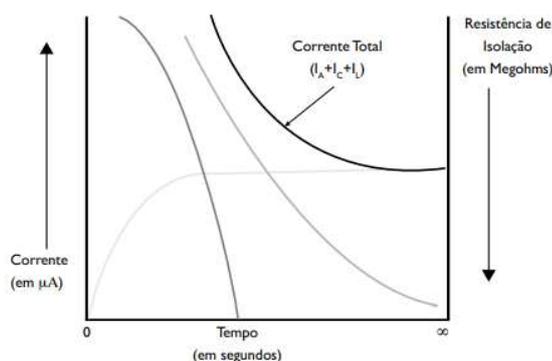
- 12) Aciona-se o megôhmetro, sem executar qualquer contato entre os terminais e ajustar o ponteiro no “infinito”, girando o botão de ajuste para tal fim;
- 13) Realiza-se a leitura da temperatura dos enrolamentos;
- 14) Seleciona-se a tensão para teste de acordo com o equipamento a ser testado;
- 15) De forma que as leituras não sofram influências de resistências em paralelo com a que se está avaliando, deve-se utilizar do cabo "GUARDA".
- 16) Os resultados das medidas devem ser corrigidos para a temperatura de referência.

Após a obtenção das leituras, a avaliação é realizada pela comparação dos valores de resistência de isolamento obtidas ao longo do ensaio, com medidas realizadas em intervalos de 30 segundos a 1 minuto, com duração total de dez minutos. Com estes resultados, é possível que se crie uma curva de interpretação de acordo com a Figura 9 (PAULINO, 2014).

Mostradas na Figura 11, temos I_L , que é a corrente de fuga condutiva, essa corrente geralmente aparece em elementos tais como bobinas, isto é, elementos que produzem indução. Temos também I_C , que é a corrente de carga capacitiva e que surge geralmente no início do teste. É muito comum em testes com cabos de média tensão multipolares. Por fim, temos a corrente I_A , chamada corrente de absorção e de polarização e tem a ver com poeiras e contaminantes presentes no material isolante.

Esse é um teste indicativo, mas de posse de um histórico dos valores medidos, podemos analisar a evolução da degradação da isolamento na máquina elétrica sob análise.

Figura 11 – Componentes de corrente no ensaio de resistência do isolamento DC



Fonte: CIGRE Brasil (2010)

3.3.3.2 Análise do óleo isolante/refrigerante

Este tipo de teste é o principal e mais comumente método utilizado para avaliar a condição de um transformador, uma vez que permite diagnosticar vários tipos de problemas, abrangendo basicamente a análise de gases dissolvidos e propriedades físico químicas do óleo isolante (PAULINO, 2014).

Neste aspecto, o óleo isolante gera pequenas quantidade de gases quando é submetido a determinados tipos de fenômenos de natureza elétrica ou térmica, de tal modo que a composição dos gases produzidos depende do tipo de anormalidade apresentada. Os principais tipos de gases identificados por esse tipo de análise são hidrogênio (H_2), metano (CH_4), etano (C_2H_6), acetileno (C_2H_2), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO_2). Ressalta-se, no entanto, que a análise de gases isoladamente não permite um diagnóstico correto das condições do transformador, sendo necessário que se considere o histórico de análises e possíveis sobrecargas e falhas anteriores (PAULINO, 2014).

Segundo a norma internacional IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers (1991), a avaliação de gases permite a identificação de quatro tipos principais de problemas em transformadores, sendo eles:

Óleo superaquecido: a decomposição do óleo utilizado nos transformadores libera etileno, etano e metano, com pequenas quantidades de hidrogênio. Se existir alguma falha severa e envolver gases elétricos, existe a possibilidade de que ocorra a liberação de acetileno.

Celulose superaquecida: a ocorrência de superaquecimento de celulose libera dióxido (CO_2) e monóxido de carbono em grande quantidade. Outrossim, metano (CH_4) e etileno (C_2H_4) também podem ser formados caso ocorra falha de alguma estrutura impregnada com óleo.

Descargas parciais: a ocorrência de descargas elétricas de baixa energia são responsáveis por produzir hidrogênio e metano, com pequenas quantidades de etileno e etano. Por outro lado, descargas envolvendo celulose podem produzir quantidades comparáveis de dióxido e monóxido de carbono.

Arco elétrico: a ocorrência de arco elétrico libera grandes quantidades de acetileno e hidrogenio, sendo produzido ainda em menor quantidade metano e etileno.

Em caso de falha envolvendo celulose, pode haver ainda a presença de dióxido e monóxido de carbono.

Em relação a análise físico-química os óleos isolantes devem atender às características determinadas pela Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Entretanto, estas características dizem respeito a condição inicial do óleo isolante, de modo que ao longo da utilização dos transformadores o óleo sofre alterações de características, sendo necessária a realização de análises periódicas para manutenção das propriedades deste. Para tanto, devem-se realizar avaliações físico-químicas, cujos resultados são utilizados para estabelecer procedimentos de manutenção preventiva que evitem falhas prematura e estendem a vida útil do equipamento e devem estar em consonância com o prescrito pela norma ABNT NBR 10576, que trata das diretrizes para supervisão e manutenção de óleo mineral isolante de equipamentos elétricos (PAULINO, 2014).

Outro teste importante para avaliação de óleo isolante, especialmente para transformadores com tensão igual ou superior a 230 kV, é o controle de partículas presentes no óleo isolante, uma vez que o surgimento de partículas de ferro, alumínio, cobre e fibras de celulose úmidas são intrínsecos ao processo de fabricação de transformadores, entretanto, devido as suas propriedades condutoras, é imprescindível que as mesmas sejam removidas de forma a tornar o equipamento apto ao funcionamento (PAULINO, 2014).

A avaliação da temperatura do óleo é outro aspecto a ser avaliado. Assim, todos os transformadores são dotados de termômetros analógicos ou digitais para medição da temperatura do óleo e dos enrolamentos, permitindo que se faça o acompanhamento da temperatura do equipamento. Para o óleo, o sistema é composto de sensores imersos no líquido isolante. Já para os enrolamentos, a medição é feita através de transformadores de corrente de imagem térmica, que por meio dos dados de projeto, estimam a temperatura das bobinas (PAULINO, 2014).

3.3.3.3 Verificação da relação de transformação

Segundo Anschau (2020), o teste de relação de transformação tem como finalidade verificar o valor da relação de transformação de um transformador elétrico.

Uma das características mais importantes de um transformador, é o mecanismo responsável por fazer a mudança nos níveis de tensão, com o objetivo de abaixar ou aumentar a tensão (PETRUZELLA, 2014). Deste modo, de acordo com

Anschau (2020), o teste de relação de transformação tem como finalidade verificar o valor da relação de transformação de um transformador elétrico. Por isso, este ensaio tem como premissa, verificar se a determinada relação está de acordo com os valores pré-estabelecidos por norma, e se os mesmos estão de acordo com os valores de placa (BISPO, 2019).

O método de avaliação da relação de transmissão comumente utilizado é muito simples de ser aplicado, onde compara-se uma tensão no lado de baixa com uma respectiva tensão no lado de alta ou vice-versa, utilizando-se a relação:

$$V_1 = aV_2$$

Onde:

V_1 é a tensão nos terminais de alta;

V_2 é a tensão nos terminais de baixa;

a é a relação de transformação do transformador (OLIVEIRA, 2008).

A relação de transformação do transformador deve ser verificada em todas as derivações do transformador. As tensões são consideradas sempre com o transformador operando em vazio e os limites de tolerância são definidos pela norma NBR 5356 (OLIVEIRA, 2008), mostrado na Tabela 1.

Tabela 1 – Tolerância para ensaio de relação de transformação

Características especificadas	Tolerância
Relação de tensões em qualquer derivação Deve ser aplicada a menor das tolerâncias indicadas	$\pm 0,5\%$
Em transformadores providos de derivações, quando a tensão por espira for superior a 0,5% da tensão de derivação respectiva, a tolerância especificada aplica-se ao valor da tensão correspondente à espira completa mais próxima	$\pm 1/10$ da impedância de curto-circuito, expressa em porcentagem.

Fonte: ABNT (2007)

3.3.4 Transformadores para instrumentos

Os transformadores de instrumentos são fundamentais para se monitorar as grandezas variáveis em uma subestação, os mais comuns são o TC (transformador de corrente) e pelo TP (transformador de potencial), são equipamentos empregados para realizar a conexão entre as instalações de tensões e correntes elevadas e os equipamentos de medição e de proteção. Do mesmo modo que os transformadores de força, os transformadores de instrumentos são compostos por dois enrolamentos, o primário, que é conectado ao sistema e o secundário, que é ligado ao equipamento de medição ou proteção, dependendo da sua utilidade (MENDES, 2018).

Quando se trata dos transformadores de potência (TC), estes são utilizados quando não é possível isolar sistemas de alta tensão para realização de medições diretamente na rede primária e podem ser visualizados nas Figuras 12 e 13.

Figura 12 – Transformadores do tipo TC



Fonte: Rehtom Eletromecânica (2022)

Figura 13 – Transformadores TC de média tensão

Fonte: Rehtom Eletromecânica (2022)

Do mesmo modo, os TPs (Figuras 14 e 15) são incumbidos de produzir os efeitos de transição e de regime permanente aplicados ao circuito primário no secundário do mesmo, o que é realizado com a ligação do primário em derivação ao sistema e o secundário, utilizado para alimentação dos instrumentos de medição e proteção. Os valores nominais de saída, assim como a relação de transformação dos TPs são padronizados de acordo com a NBR 6855:2009 (MENDES, 2018).

Figura 14 – Transformadores de potencial 15 Kv para uso abrigado

Fonte: Rehtom Eletromecânica (2022)

Figura 15 – Transformadores de potencial 15 Kv para uso desabrigado

Fonte: Rehtom Eletromecânica (2022)

De acordo com Mendes (2018), no que diz respeito a construção dos TPs, estes podem ser classificados em: Transformadores de potencial capacitivo, que

utilizam internamente um divisor capacitivo e são utilizados em sistemas acima de 138 kV, com a função de dividir a tensão e acoplar a troca de informações via PLC (*Power Line Carrier*) ao sistema de potência; Transformadores de potencial indutivo, que possuem as mesmas características dos transformadores de força, mas são conectados a cargas de menor tamanho e usados predominantemente em tensões de até 69 kV; e Divisores resistivos, capacitivos e mistos, que são aplicados apenas em circuitos de ensaios e pesquisas, se assemelhando aos TPs indutivos e capacitivos, mas construídos com resistores para divisão da tensão.

Os transformadores de corrente (TC), atuam limitando os valores criados pelo circuito de alta tensão, de maneira que a medição das grandezas elétricas seja realizada sem o comprometimento da estrutura dos aparelhos. Neste tipo de transformador, o enrolamento primário é ligado em série com a alta tensão, possuindo valor de impedância desprezível quando analisada desse lado, independentemente do valor da carga no seu secundário. Deste modo, este instrumento é capaz de produzir a corrente do seu primário no secundário com sua posição fasorial mantida (MENDES, 2018).

Este tipo de equipamento pode ser utilizado com duas finalidades principais:

- 1) Serviço de medição: quando utilizados para esta função, necessitam de alto grau de exatidão (entre 0,3 e 0,6% de erro), uma vez que alimentam medidores que geralmente são referentes a faturamento. Além disso, saturam com aproximadamente quatro vezes a corrente nominal, o que ajuda a proteger os instrumentos a eles ligados;
- 2) Serviço de proteção: os modelos utilizados para esta finalidade, não necessitam de altos níveis de exatidão e trabalham na faixa de 10 a 20% de erro de medição, com saturação em torno de vinte vezes a corrente nominal. Deste modo, são utilizados para suprir equipamentos de proteção e para realizar o isolamento entre circuito primário e secundário (MENDES, 2018).

3.3.4.1 Medição de resistência de isolamento

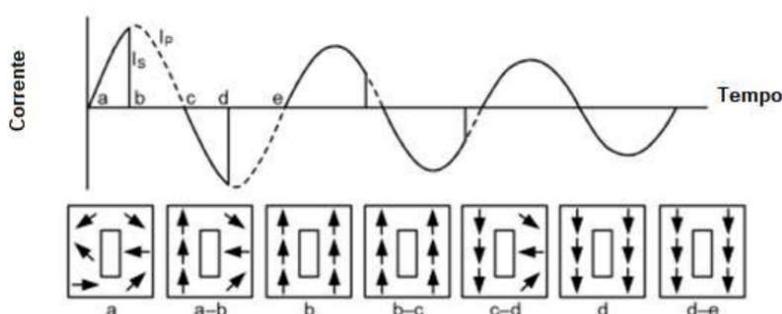
Idem item 3.3.1.1.

3.3.4.2 Saturação

No que se refere a saturação, este é um indicador da funcionalidade dos transformadores de corrente. Deste modo, a corrente circulante no enrolamento primário do TC induz um fluxo magnético no interior do núcleo, feito de material ferromagnético, de modo que a partir de um determinado valor de intensidade de campo magnético, todos os dipolos que compõem o núcleo estão orientados na direção deste campo e não é possível aumentar a densidade de fluxo. Assim, diz-se que o núcleo está saturado. Outrossim, existem dois tipos de saturação aos quais o TC pode estar submetido: saturação simétrica e assimétrica (MOURA, 2019).

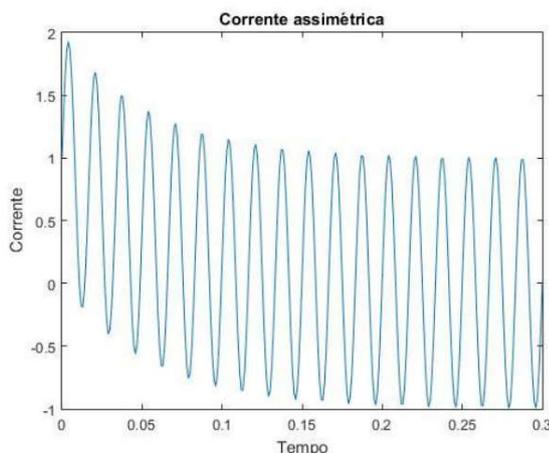
A saturação simétrica (Figura 16) dá-se quando uma corrente primária senoidal (sem componente contínua) circula no primário e possui um valor maior que aquele que o núcleo é capaz de suportar para um determinado valor de carga secundária (HARGRAVE; THOMPSON; HEILMAN, 2017), enquanto que a saturação assimétrica (Figura 16), ocorre a partir da circulação de uma corrente primária que possui uma certa componente contínua, ou seja, um offset (MOURA, 2019). Assim, de acordo com (BANDEIRA, 2004) a curva de saturação do TC define uma região satisfatória para operação dentro das suas características nominais e de acordo com as especificações do circuito onde operará. É um dos elementos utilizados na especificação do TC para sua operação em campo.

Figura 16 - Correntes e representação da orientação do fluxo magnético na saturação simétrica



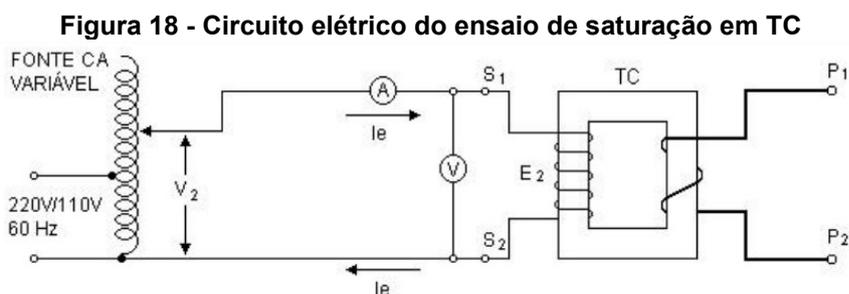
Fonte: Adaptado de Hargrave *et al.* (2017)

Figura 17 - Forma de onda de uma corrente assimétrica



Fonte: Moura (2019)

A avaliação da saturação de uma TC, consiste em levantar a curva de magnetização do núcleo do TC (BANDEIRA, 2004). Assim, o ensaio de saturação é realizado basicamente com o circuito de ensaio demonstrado numa Figura 17. Uma fonte de tensão CA variável é conectada ao circuito secundário do TC com o primário aberto e instrumentos de medição (amperímetro (A) e volímetro (V)) são conectados no circuito de ensaio como mostra a figura. Antes e depois do ensaio deve ser feita a desmagnetização do núcleo.



Fonte: Bandeira (2004)

Após a desmagnetização do núcleo o ensaio é iniciado. A tensão de excitação é então aplicada desde 0 V até o limite especificado pelo laboratório. A tensão é aplicada em degraus pré-definidos e a cada degrau de tensão, a elevação da tensão é interrompida para a medição da tensão e corrente de excitação, onde os dados são registrados manualmente em folha de ensaio. Os dados de ensaio são passados manualmente para uma planilha EXCEL onde é gerado o gráfico da curva de saturação (BANDEIRA, 2004).

3.3.5 RELÉS DE PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE E OUTROS

Relés de proteção (Figura 19) são equipamentos utilizados como sistemas de proteção para garantir o bom funcionamento de sistemas elétricos quando estes estão sujeitos a falhas ou sobrecargas, danificações do isolamento, quebra de condutores, dentre outros, causando elevadas correntes de curto-circuito, que por sua vez, podem causar danos nos equipamentos do SEP (MENDES, 2018).

Figura 19 - Circuito elétrico do ensaio de saturação em TC



Fonte: Mendes (2018)

Os relés de proteção são denominados de acordo com sua função. Assim:

- 1) Relé de Religamento – Função ANSI (79): possuem como objetivo, diminuir o tempo de interrupção de energia, conservando a estabilidade do sistema e evitando sobrecargas, podendo ser monopolar ou tripolar. Este tipo de relé possui um temporizador para contagem do tempo necessário para que o disjuntor restabeleça suas características dielétricas;
- 2) Relé de Sobrecorrente Instantâneo – Função ANSI (50): são utilizados em diversos pontos da subestação para detecção de sobrecorrente de alta amplitude;
- 3) Relé de Sobrecorrente Temporizado – Função ANSI (51): empregados em diversos pontos da subestação para detecção de sobrecorrente;
- 4) Relé de Sincronismo – Função ANSI (25): utilizados com a finalidade de sincronizar geradores, LT's ou tensões de barras. Isto é feito a partir de comparação dos valores de tensão (módulo e ângulo) de dois enrolamentos secundários de transformadores de potencial;
- 5) Relé de Sobretensão – Função ANSI (59): são responsáveis por proteger o sistema elétrico contra sobretensões de maior duração (quanto maior a amplitude, menor o tempo de tolerância). Quando $V > V_{max}$ admissível, o relé atua e provoca disparo dos disjuntores.

6) Relé de Subtensão – Função ANSI (27): responsáveis por evitar o prolongamento de situações de subtensão. Quando $V < V_{\min}$ aceitável, o relé atua provocando o disparo dos disjuntores, sendo em alguns casos combinada com a proteção de sobrecorrente para melhor caracterização do curto-circuito.

7) Relé de Sobrecorrente com restrição de tensão – Função ANSI (51V): diferencia a situação de sobrecarga da situação de curto-circuito.

8) Relé de Bloqueio – Função ANSI (86): são multiplicadores de contato, que atuam nos circuitos de disparo e bloqueiam o fechamento dos disjuntores, sendo providos de chave para rearme mecânico ou de botoeira para rearme elétrico (MENDES, 2018).

O funcionamento dos relés de proteção é dado através de uma corrente pick-up, que nada mais é que a corrente para a qual o relé inicia a atuação). O valor da corrente pick-up é determinado de forma que o relé possa identificar o menor curto-circuito e ao mesmo tempo, não confundir oscilações normais do sistema com ultrapassagem dos níveis internamente ajustados, de modo que tal valor é dado por meio da seguinte equação:

$$I_{pick-up} = 1,5 \cdot I_{nominal}$$

Os valores nos primários dos TCs são dados pela Tabela 2.

Tabela 2 - Correntes de pick-up

Relé	$I_{nominal}$ (A)	$I_{pick-up}$ (A)
Oc11	1338	2007
Oc12	1205	1808
Oc21	669	1004
Oc22	603	904
Oc31	603	904
Oc32	543	814
Oc41	603	904
Oc42	543	814
Oc51	420	630
Oc51	498	747

Fonte: Souza (2010)

3.3.5.1 Aferição e calibração

Os tipos de ensaios realizados em relés de proteção podem ser classificados em: ensaios de regime permanente, ensaios dinâmicos, ensaios de simulação de transitórios, ensaios de integridade e ensaios de aplicação (GOSALIA, 1996).

De acordo com Gosalia (1996), o ensaio de regime permanente é empregado visando determinar o ponto de calibração ou ajuste para algum parâmetro medido, onde os fasores aplicados ao relé são mantidos estáveis por um tempo muito maior do que o tempo de operação do relé e são incrementados com valores muito menores do que a resolução deste.

Já o teste de estado dinâmico os fasores são aplicados ao relé representando múltiplas condições do sistema de potência, onde os mesmos são modificados de forma síncrona, representando assim os estados de pré-falta, falta e pós-falta. O ensaio de simulação de transitório, por sua vez, utiliza sinais que podem surgir ao longo da operação do sistema e afetar diretamente a operação do relé como surgimento de componente contínua de corrente ou saturação dos transformadores de instrumento, por exemplo (GOSALIA, 1996).

O ensaio de integridade é destinado a comprovar se o relé foi fabricado, entregue, instalado e mantido de acordo com as especificações informadas pelo fabricante e em conformidade com as normas vigentes. Esse tipo de ensaio deve ser realizado periodicamente na maioria dos relés em virtude de sua importância no sistema e deve proceder a realização do ensaio de aplicação (GOSALIA, 1996).

O ensaio de aplicação é utilizado para garantir se o relé está apto a realizar suas funções no sistema específico em que será instalado. Sua maior ocorrência se dá quando os ensaios de integridade não fornecem informações suficientes a respeito da operação desejada. Situações de “campo” podem ser simuladas ou registradas, por meio de um registro de oscilografia, e aplicadas no relé sob teste (GOSALIA, 1996).

3.3.6 Para-raios

Para-raios são equipamentos cuja função é evitar que as tensões excessivas provocadas pelas descargas elétricas oriundas de raios e de origem interna procedentes de manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, provoquem danos nos equipamentos das subestações. Este sistema é executado de modo que limite as sobretensões a um valor máximo, estabelecendo um nível de proteção ao sistema que ele está protegendo (MAMEDE FILHO, 2013).

Neste contexto, de acordo com Mamede Filho (2013) as sobretensões de um sistema podem ser temporárias, de manobra e atmosférica. A primeira acontece

quando varia a carga ligada no sistema, a segunda ocorre por chaveamentos ou manobras e a terceira, como o nome já diz ocorre devido a raios na rede.

Visando realizar a proteção dos equipamentos elétricos contra estes tipos de sobretensões, deve-se utilizar para-raios com propriedades de não linearidade dos elementos de que são fabricados, no caso, utilizam dispositivos com estabilidade química e elétrica, com a função de, ao mesmo tempo que drenam altas correntes de descarga para a terra, apresentam nsões residuais mínimas. Assim, existem dois tipos principais de elementos que podem desempenhas as funções de proteção com caraterísticas não lineares que compõem a construção de uma para-raio, sendo o carbonato de silício e o óxido de zinco (MAMEDE FILHO, 2013).

Os para-raios de carboneto de silício (Figura 20) são aqueles que utilizam o carboneto de silício como resistor não linear e tem em série um centelhador que é constituído de um ou mais espaçadores entre eletrodos, cujo objetivo é interromper a passagem da corrente. O carboneto de silício é obtido no beneficiamento do carborundo com adição de alguns produtos, como o bismuto, sendo fabricado, comprimido e sintetizado estas substâncias originando o bloco de carboneto de silício. O corpo do para-raios de carboneto de silício é de porcelana vitrificada de alta resistência onde estão alojados os elementos ativos (MAMEDE FILHO, 2013).

Figura 20 – Para-raios de carboneto de silício



Fonte: Pallaro (2013)

Já os para-raios de óxido de zinco (Figura 21), são dispositivos que na sua construção utilizam o óxido de zinco como resistor não linear e não têm em série um

centelhador. O óxido de zinco é obtido por um composto a partir da mistura de óxido de zinco e outros óxidos metálicos, como o antimônio, o manganês, o bismuto e o cobalto, sendo fabricado, comprimido e sintetizado estas substâncias originando o bloco cerâmico de óxido de zinco. O para-raios de óxido de zinco é constituído basicamente por varistores revestidos por um invólucro de porcelana ou invólucro polimérico. Estes varistores constituem materiais não ôhmicos, ou seja, não obedecem a Lei de Ohm (ALVARES, 2008).

Figura 21 – Para-raios de óxido de zinco



Fonte: Adantas Comercial (2022)

A norma de ensaio de para-raios é a NBR 5287, e podemos citar alguns de tipo, que são: Tensão suportável a impulso atmosférico e no invólucro, tensão suportável à frequência industrial, tensão residual à impulso de corrente íngreme, de impulso atmosférico e a impulso da corrente de manobra. Os para-raios utilizados na distribuição tem sempre os desligadores automáticos testados, pois são eles que nos dão a indicação de avaria no dispositivo. Também temos ensaios de envelhecimento, tensão disruptiva a impulso atmosférico, etc.

Os fabricantes cadastrados nas concessionárias podem apresentar documentos que provam que os ensaios foram realizados, sendo por isso, dispensados de fazê-los. Os ensaios de rotina verificam a qualidade dos materiais utilizados nos para-raios. Dentre eles temos: Descargas parciais, ensaio dielétrico, correntes de fuga em operação CC, etc. Já os ensaios de recebimento verificam em que condições os materiais foram embarcados. Alguns ensaios são repetidos, pois já foram feitos nas etapas de rotina e tipo, tais como: Tensão residual a impulso atmosférico, tensão de referência, descargas parciais, corrente de fuga e componentes resistivos em operação CC.

3.3.6.1 Medição de resistência de isolamento

Idem item 3.3.1.1.

3.3.7 Isoladores

Isoladores (Figura 22) são materiais que apresentam condutividades elétricas pequenas, que fazem com que a corrente que circule nele seja ínfima, chegando a ser desprezível. Outrossim, são elementos sólidos dotados de propriedades mecânicas capazes de suportar grandes esforços, produzidos pelos condutores. Eletricamente, exercem a função de isolar os condutores submetidos a uma diferença de potencial em relação à terra (estrutura de suporte) ou em relação a um outro condutor fase (MAMEDE, 2005).

Figura 22 – Isoladores utilizados em subestações



Fonte: Freepik (2022)

3.3.7.1 Medição de resistência de isolamento

Idem item 3.3.1.1.

3.3.8 Buchas

Buchas são elementos fundamentais em sistemas elétricos. Tem a função de isolar partes com potenciais elétricos diferentes, podendo ser usadas ao tempo ou em subestações abrigadas. São caracterizadas principalmente em função dos níveis de tensão e capacidade de corrente. De acordo com Mamede (2013, p.213) as buchas de passagem são “elementos que possuem uma isolação própria para a instalação em cubículos metálicos ou de alvenaria e em equipamentos diversos”, cuja função é “permitir a passagem de um circuito de um determinado ambiente para outro”.

Alguns modelos de buchas de passagem são mostrados na figura 23 e também, tais como os isoladores, tem que ter suportabilidade mecânica. Em subestações de média tensão, são utilizadas principalmente para fazer a conexão do circuito entre um cubículo e outro, através da parede.

As especificações para buchas utilizadas em transformadores a óleo isolante, classe 15kV são dadas na norma NBR5435.

Figura 23 - Buchas de passagem utilizadas em subestações



Fonte: Adantas Comercial (2022)

Buchas não-capacitativas são aquelas que possuem um condutor revestido por material isolante como porcelana, vidro, resina, papel, etc. Já as buchas aterradas, são aquelas utilizadas em tensões nominais acima de 50 kV, cujo material isolante mais utilizado para este tipo de bucha é papel com resina ou óleo, sob as seguintes denominações: papel resinado (RBP), papel impregnado em óleo (OIP) e papel impregnado em resina (RIP) (SILVA, 2021).

3.3.8.1 Medição de resistência de isolamento

A descrição de como realizar a medição da resistência do isolamento pode ser visualizada no item 3.3.1.1.

3.3.8.2 Determinação da temperatura e umidade

Variações na temperatura e na umidade relativa do ar também são responsáveis por provocar mudanças nos valores de capacitância e no fator de potência de buchas capacitivas (STIRL *et al.*, 2016). Deste modo, o conhecimento da temperatura do topo do óleo do transformador, da temperatura ambiente e da umidade

relativa do ar é importante para a correta avaliação do estado das buchas. Outrossim, a correlação entre a variação da temperatura de topo do óleo e a variação do fator de potência da bucha, constitui-se uma ferramenta suplementar na identificação de problemas.

Ainda de acordo com Lachman, Walter e Guggenberg (2000), como o conjunto trifásico de buchas de um transformador é sujeito às mesmas condições de ambiente, a ação da temperatura e da umidade nas correntes disponíveis nos tapes capacitivos pode ser compensada pelo cálculo do somatório das correntes.

Deste modo, sabe-se que em sistemas ideais, quando as buchas são idênticas e as tensões do sistema estão balanceadas, o somatório das correntes é nulo. No entanto, as buchas nunca são idênticas e por isso, o sistema nunca está perfeitamente balanceado. Assim, enquanto nenhuma das buchas apresenta sinais de deterioração, o somatório das correntes é praticamente constante, possuindo uma pequena oscilação em torno de um valor médio (LACHMAN, WALTER, GUGGENBERG, 2000).

Ao realizar a identificação das variações de capacitância e no fator de potência de isolamento de buchas capacitivas, é possível identificar a necessidade de manutenção ou de trocas de buchas. Na Tabela 3, é possível observar os níveis utilizados por concessionárias no monitoramento de buchas.

Tabela 3 - Limiares empregados na avaliação do estado da isolamento de buchas de alta tensão

Parâmetro medido em ensaio	Diagnóstico		
	Aceitável	Medir com mais frequência	Retirar de Operação
Capacitância	1 ... 1,05 C _{PLACA}	1,05 ... 1,1 C _{PLACA}	➤ 1,1 C _{PLACA}
Fator de Potência	1 ... 2 FP _{PLACA}	2 ... 3 FP _{PLACA}	>3 FP _{PLACA}

Fonte: Adaptado de Rambo et al. (2007)

3.3.9 Banco de baterias/*no-break*

O banco de baterias em uma subestação é um sistema utilizado quando ocorre falha nos retificadores ou quando não há alimentação no barramento de emergência. Neste segundo caso, a alimentação por meio de bancos de bateria é a única forma possível de garantir o desligamento seguro da subestação, o que demonstra a importância de garantir o adequado funcionamento dos componentes deste sistema (THIELE, 2017).

Neste aspecto, as baterias que podem ser utilizadas nestas estruturas possuem diferentes tipos de construção, podendo ser seladas, ventiladas estacionárias ou reguladas por meio de válvulas, de modo que o elemento ativo metálico pode ser constituído de chumbo, níquel, cádmio, lítio, dentre outros tipos de componentes (THIELE, 2017).

Por outro lado, o *no-break*, também conhecido como UPS (*Uninterruptible Power System*) ou sistema ininterrupto de potência, é o módulo que tem por finalidade fornecer sem risco de parada a alimentação de 220Vca estabilizadas às cargas críticas da usina. É um equipamento formado por três blocos, sendo eles: retificador, inversor e chave estática, além de possuir uma alternativa de alimentação em *By-Pass* em caso de manobra no cubículo (THIELE, 2017).

Na prática, para subestações 15kV, as concessionárias já definem um padrão para o *no-break*. Geralmente uma potência de 1000VA é suficiente para alimentar as cargas da subestação encarregadas da proteção. Normalmente, a maior carga seria o motor do disjuntor, que pode chegar a 700VA, temos também algum consumo no relé, lâmpadas do painel, iluminação de emergência, etc. Portanto, sempre verificar o que a concessionária exige para isso. Na Figura 24 é possível observar o painel de um *no-break*.

A manutenção de baterias estacionárias é contemplada nas normas NBR15541 e NBR16487.

Figura 24 – Painel de um *no-break* utilizado em subestações



Fonte: Thiele (2017)

3.3.9.1 Medição de resistência de isolamento

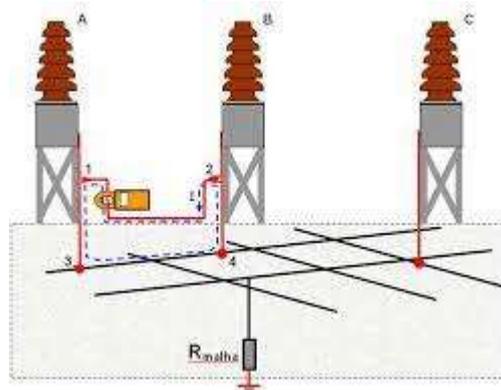
Idem item 3.3.1.1.

3.3.10 Outros equipamentos e testes

3.3.10.1 Malha de terra

Quando se trata de instalações elétricas, se sabe que estas devem possuir um ponto de contato com a terra, servindo como referência do sistema. Esse ponto pode ser formado por apenas uma haste metálica ou por uma grande malha de terra constituída por cabos elétricos nus, hastes de metal e soldas exotérmicas, como pode ser visualizado na Figura 25 (MAMEDE FILHO, 2022). Assim, de acordo com Pereira Filho e Cardoso (2014) o projeto de construção de malhas de aterramento para subestações deve considerar os potenciais de toque e de passo sob o aspecto de segurança de pessoas e o valor da resistência de aterramento o aspecto de desempenho. Outrossim, Modena e Sueta (2022) afirmam que um projeto adequado de aterramento deve assegurar que os níveis de corrente de curto-circuito fase-terra sejam suficientes para sensibilizar a proteção de retaguarda.

Figura 25 – Esquema de construção de malha de terra em uma subestação



Fonte: Santos, Gonçalves (2010)

Após a construção, devem ser realizados testes de medição de resistência ôhmica que tem como finalidade conferir os valores propostos pelos cálculos de engenharia. Neste aspecto, existem diversos tipos de ensaios que são direcionados para a conferência das condições das malhas de terra em relação ao projeto, entretanto, a grande maioria dos testes deve ser realizada com o sistema desenergizado, além de não considerar a existência de cabos guarda para que proporcionam um ensaio sem influências ao sistema (malha de aterramento) que se pretende analisar (DIAS, 2011).

Entre os testes que podem ser realizados, cita-se a medição da resistência de aterramento, que possui extrema importância para que se proceda a coordenação de isolamento e coordenação da proteção do sistema elétrico. Por isso, as principais metodologias que podem ser utilizadas para esta avaliação são: método de queda de potencial (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 1992), método da regra de 62% (TAGG, 1964, p.178) e método da interseção das curvas (TAGG, 1970).

A medição da resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo é vista na NBR15749, em seus itens 5 e 6 que versam tanto sobre o método, quanto aos equipamentos de proteção individual de segurança necessários para se fazer a medição.

3.3.10.1.1 Método da Queda de Potencial

Este método consiste na aplicação de um equipamento terrômetro de quatro terminais, que é o mesmo utilizado para as medições de resistividade (Figura 26). A corrente injetada na malha de aterramento em teste é recebida em outro sistema de aterramento.

Figura 26 - Equipamento para medição de Resistência de Terra – Megger



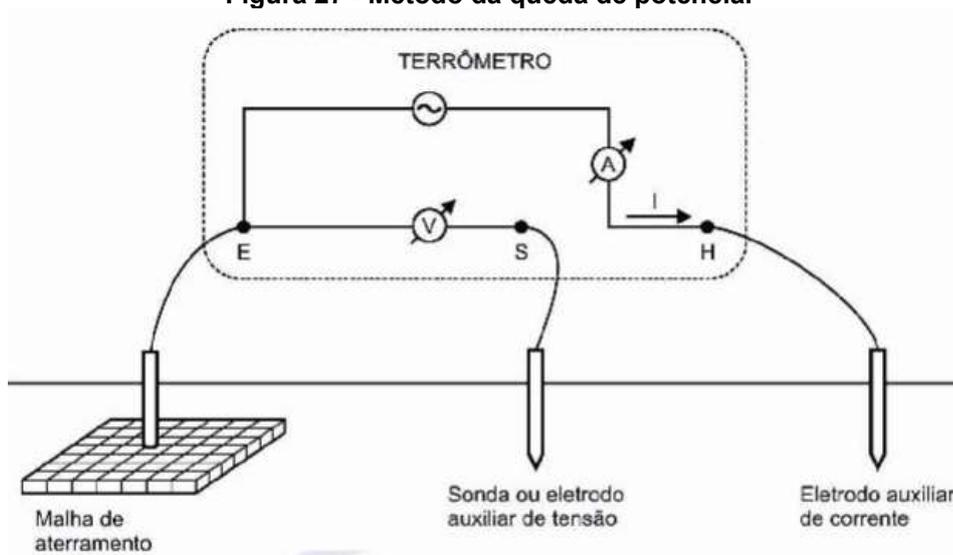
Fonte: Dias (2012)

O método da queda de potencial, consiste basicamente em se fazer circular uma corrente através da malha de aterramento sob ensaio por intermédio de um eletrodo auxiliar de corrente e medir a tensão entre a malha de aterramento e o terra de referência (terra remoto) por meio de uma sonda ou eletrodo auxiliar de potencial (ABNT, 2009, p.5).

O método citado na NBR15749, também chamado método da queda de potencial, está representado na figura 27. O aparelho terrômetro injeta uma corrente

conhecida no solo, através do eletrodo auxiliar de corrente, e a partir da leitura do potencial elétrico que surge no eletrodo auxiliar de tensão, estabelece a resistência do solo para o ponto medido. Depois de sucessivas medições, onde se varia gradativamente a posição do eletrodo auxiliar de tensão, podemos estabelecer a curva de resistência daquele local, onde, a partir do comportamento da curva, conseguimos também verificar problemas na medição.

Figura 27 - Método da queda de potencial



Fonte: ABNT (2009, p.5)

3.4 Aspectos de segurança na manutenção e operação em subestações

De acordo com a Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG (2022) em 2021, em todo o Brasil foram registrados 1.585 acidentes de origem elétrica, que resultaram em 761 mortes.

Neste contexto, sabe-se que a manutenção e operação de subestações, por envolver altas tensões elétricas, representa uma tarefa perigosa para os funcionários. Por isso, toda atividade realizada nestes locais deve levar em consideração as normas adequadas de segurança. Deste modo, a portaria TEM nº598, de 07 de dezembro de 2004 por meio da NR-10, estabelece as normas de segurança em instalações e serviços em eletricidade (GUIA TRABALHISTA, 2022).

Esta norma regulamentadora estabelece os requisitos e condições mínimas a implementação de medidas de controle e de sistemas preventivos, garantindo a segurança e a saúde dos trabalhadores que, de modo direto ou indireto, atuem em instalações elétricas e em ambientes próximos. Outrossim, esta NR é aplicada às fases de geração, transmissão, distribuição e consumo e inclui as etapas de projeto, construção, montagem e operação, manutenção das instalações elétricas e quaisquer trabalhos realizados nas suas proximidades (GUIA TRABALHISTA, 2022).

3.5 Normas de subestações de energia elétrica

A crescente de demanda por geração de energia elétrica, pode ser considerada uma das principais necessidades da sociedade contemporânea, uma vez que desempenha um papel fundamental no crescimento econômico (TURMINA *et al.*, 2018). O uso da energia elétrica se faz essencial na sociedade moderna, uma vez que além de proporcionar maior conforto para a população, a sua utilização proporciona aumento da capacidade da produção de bens e serviços, nos diversos setores da economia (FINKLER *et al.*, 2016).

Tal informação é justificada, de acordo com Finkler *et al.* (2016) quando se verifica a relação entre o crescimento econômico e o consumo de energia, representadas em percentual através da variação do PIB (Produto Interno Bruto) e do consumo de energia mundial para o período entre 1998 a 2007. Assim, dados expostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2008), indicam que durante este período em todos os momentos de crescimentos do PIB do Brasil, o consumo de energia também apresentou elevação. Por outro lado, nos anos onde houve queda do PIB, constatou-se diminuição do consumo de energia.

Em consonante com os dados acima, no período de 1970 a 2019, o consumo final de energia elétrica no país apresentou uma taxa média de crescimento de 5,58% ao ano, totalizando um aumento de pouco mais de 1276% ao final do período analisado (BARBOSA; MATTOS, 2022).

Apresentam dois papéis principais: processar a energia elétrica alterando o nível de tensão em seu barramento e proporcionar conexões adequadas para as linhas ou alimentadores interconectados no mesmo.

Atualmente, dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) indicam que existem 772 subestações em operação no Brasil, sendo a maioria instalados nas regiões Sudeste e Sul do Brasil. Outrossim, até 2033 um total de 85 subestações está programado para entrar em operação, mas o valor não inclui 89 unidades cuja data de início ainda não foi definida (BNAMERICANAS, 2022).

A construção de subestações de energia elétrica deve ser mediada e baseada em normas regulamentares que garantam o funcionamento da mesma e a segurança dos trabalhadores. Entre estas normas, destaca-se a NR N° 10, criada em 1978 por meio da portaria 3214 de 8 de junho de 1978, que foi chamada de “Instalações e Serviços de Eletricidade”. A partir desta data, esta NR já foi atualizada quatro vezes,

sendo a quarta alteração realizada em função da adequação dos requisitos sobre capacitação, direitos e obrigações previstos na nova versão da Norma Regulamentadora nº 01 (NR-01), trazida pela Portaria nº 915 da Secretaria Especial de Previdência e Trabalho, do Ministério da Economia, em 30 de julho de 2019 (GOVERNO DO BRASIL, 2019).

Além da NR N° 10, as principais normas que abrangem as atividades desenvolvidas em subestações elétricas são:

- ABNT NBR 5456 - Eletricidade geral - Terminologia.
- ABNT NBR IEC 60694 - Especificações comuns para normas de equipamentos de manobra de alta-tensão e mecanismos de comando.
- ABNT NBR IEC 60529 Versão Corrigida: 2009 - Graus de proteção para invólucros de equipamentos elétricos (código IP).
- ABNT NBR 6323 - Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido – Especificação.
- ABNT NBR 7397 - Produto de aço ou ferro fundido revestido de zinco por imersão a quente - Determinação da massa do revestimento por unidade de área - Método de ensaio.
- ABNT NBR 7398 - Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da aderência do revestimento – Método de ensaio.
- ABNT NBR 7399 - Produto de aço ou ferro fundido galvanizado por imersão a quente - Verificação da espessura do revestimento por processo não destrutivo - Método de ensaio.
- ABNT NBR 7400 - Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido por imersão a quente - Verificação da uniformidade do revestimento - Método de ensaio.
- ABNT NBR 7414 - Galvanização de produtos de aço ou ferro fundido por imersão a quente – Terminologia.
- ABNT NBR 11388 Versão Corrigida: 1993 - Sistemas de pintura para equipamentos e instalações de subestações elétricas – Especificação.
- ABNT NBR 9366 - Tratamento e pintura de superfícies metálicas.
- ABNT NBR 10443 - Tintas e vernizes - Determinação da espessura da película seca sobre superfícies rugosas - Método de ensaio.
- ABNT NBR 11003 Versão Corrigida: 2010 - Tintas - Determinação da aderência.

- ABNT NBR 5032 - Isoladores para linhas aéreas com tensões acima de 1.000 V - Isoladores de porcelana ou vidro para sistemas de corrente alternada.
- NEMA SG6 - Nema Standard Publication for Power Switching Equipment.
- ANSI-C29.8 - American National Standard for Wet-process Porcelain Insulator (aparatus cap and pin type).
- ANSI-C37.30 - American National Standard Definitions and Requirements for High-Voltage Air Switches, Insulators and Bus Supports.
- ANSI-C37.32 - American National Standard Schedules of Preferred Ratings, Manufacturing Specification and Application Guide for High - Voltage Air Switches, Bus Supports, and Switch Accessories.
- ANSI-C37.34 - American National Standard Test Code for High-Voltage Air Switches.
- NBR 7095 – Ferragens eletrotécnicas para linhas de transmissão e Subestação de alta tensão e extra-alta tensão – Especificação;
- NBR 9050 – Acessibilidade a Edificações, Mobiliário, Espaços e Equipamentos Urbanos;
- IEC 61850 – Communication network and systems for power utility automation;
- IEEE 1613 – Standard Environmental and Testing Requirements for Communications Networking Devices in Electric Power Substations (ENERGISA, 2018).

3.6 Manutenção de subestações de energia elétrica

A manutenção de subestações de energia elétrica é a principal forma de garantir o funcionamento adequado destas instalações. Neste contexto, sabe-se que deve-se levar em consideração os três tipos existentes de manutenção: a preventiva que tem como objetivo reduzir a probabilidade de falhas ou de degradação do funcionamento de um item; a corretiva, que é aquela efetuada após a ocorrência de uma pane destinada a recolocar um item em condições de executar uma função requerida e a preditiva que é responsável por garantir a qualidade de serviço desejada, por meio da aplicação sistemática de técnicas de análise, utilizando-se de meios de supervisão centralizados ou de amostragem, para reduzir ao mínimo a

manutenção preventiva e diminuir a manutenção corretiva (ABNT, 1994; SILVA NETO; LIMA, 2002).

Neste aspecto, sabe-se que a manutenção preditiva é a mais importante dentro de uma subestação, uma vez que é a responsável pelas maiores contribuições para redução de necessidade de manutenções preventivas e corretivas. Assim, a manutenção é realizada no momento ideal, antes que o equipamento apresente alguma falha, aumentando a continuidade da operação pelo maior tempo possível. Algumas vantagens associadas a ele é o aumento da vida útil do equipamento, diminuição dos custos nos reparos, melhoria da produção, registro e acompanhamentos histórico de parâmetro e monitoramento da vida útil dos equipamentos. Apesar de exigir profissionais qualificados e equipamentos adequados que geram altos custos, este tipo de manutenção resulta em excelente retorno financeiro, uma vez que reduz a ocorrência de falhas em subestações e a necessidade de manutenções corretivas (ALMEIDA, 2021).

De acordo com Almeida (2021), a criação da estratégia de manutenção aplicada a uma subestação de potência deve ser planejada de forma a organizar as manutenções elétricas preditivas junto as preventivas e sistematizar as manutenções corretivas. No sistema de manutenção planejada, as ações de manutenções elétricas mais frequentes são previamente pensadas e organizadas, junto com ela é criado um histórico e um banco de dados de cada equipamento que integra o sistema elétrico.

A realização de manutenções em subestações requer o conhecimento de todo o sistema e de todos os equipamentos presentes na subestação. Neste aspecto, os principais equipamentos que necessitam de atenção são os disjuntores, as chaves seccionadoras, os transformadores para instrumentos, os relés de proteção de sobrecorrente, os para-raios, os isoladores, as buchas, o banco de baterias *no-break* e a malha de terra.

3.7 Ensaios e testes em subestações

Os equipamentos citados neste trabalho são essenciais para o funcionamento das subestações. Cada um possui uma função específica dentro de uma SE e a ocorrência de algum problema em qualquer parte desta estrutura pode resultar em falhas de funcionamento que além de provocarem problemas como desabastecimento

elétrico, também podem resultar em grandes perdas financeiras devido aos altos custos de manutenções corretivas.

Neste aspecto, a realização de testes e ensaios em cada uma destas estruturas é quesito essencial para uma que SE funcione adequadamente. Dentre os principais testes a serem realizados, chama-se atenção para o ensaio de resistência de contato de isolamento que tem por objetivo determinar a resistência existente entre cada um dos polos superiores e inferiores de um disjuntor quando o mesmo estiver na posição fechado. Tal resultado, determina a condição de preservação dos contatos de potência que são responsáveis pela condução ou interrupção de grandes valores de correntes, já que a condição de operação sob carga e a força mecânica disposta durante o trabalho realizado, provocam desgaste dos contatos. Este teste é de extrema importância dentro de uma subestação e é um dos poucos que deve ser realizado em todas as estruturas acima citadas. Por outro lado, todos os equipamentos possuem testes específicos a exemplo do teste de saturação em transformadores para instrumentos.

Desta forma, a realização dos testes e ensaios nestes equipamentos deve ser realizado por profissionais qualificados e que possuam experiência na condução dos mesmos, uma vez que mesmo mínimas alterações podem provocar falhas que podem resultar na parada de funcionamento das SE e/ou ainda, em altos custos para o conserto e retomada de funcionamento.

A maioria das concessionárias possui um Gerenciador de Manutenção das Subsidiárias (Geração, Transmissão e Distribuição), que é um banco de dados que roda em tempo integral, 365 dias por ano, sendo alimentado por dados produzidos pelas manutenções periódicas realizadas pelas equipes de campo. Salienta-se que estas equipes manutenções se dividem por especialidades (Automação, Eletromecânica, Linhas de Transmissão, Proteção e Telecomunicação). Tais equipes emitem relatórios sazonais para verificar as manutenções que estão por vencer, que estão sob suas responsabilidades, em determinados equipamentos/bays, como linha de transmissão, transformador, barra, banco de capacitores, etc...

Como por exemplo pode-se citar caso de uma equipe de manutenção de Proteção, a qual se tem conhecimento que por padrão e norma, a cada 6 anos, no caso de relés digitais, e 3 anos, no caso de relés eletromecânicos ou estáticos é necessário fazer uma intervenção preventiva. Então de posse das manutenções a vencer, a equipe realiza um planejamento temporal, e emite uma programação, onde

contempla a criação de uma Ordem de Serviço (OS) e uma Solicitação de Intervenção no Sistema da CONCESSIONÁRIA (SISC). De posse destas informações e documentos é realizado uma intervenção no Sistema Elétrico de Potência (SEP) a qual visa verificar o correto funcionamento do sistema de proteção através de ensaios que simulam faltas/ocorrências, observando se os ajustes parametrizados e funções ativas no relé, como por exemplo sobretensão, sobrecorrente, sincronismo, religamento, etc... estão atuando corretamente. Salienta-se que é obrigatoriamente realizar o registro de todas as atividades e resultados obtidos em relatórios digitalizados.

Findadas as atividades, tais documentos comprobatórios dos ensaios realizados são anexados na OS aberta para realização do serviço. A mesma é finalizada e dado baixa na sequência. Com isso o gerenciador de manutenção "zera a contagem de tempo", reinicializando o ciclo de manutenção. É importante ressaltar que o programa em questão possibilita que em qualquer momento seja possível acesso para verificar todo o histórico de manutenções realizadas nos equipamentos/bays. Esses dados arquivados servirão de subsídios para uma possível auditoria que poderá ser solicitada pela ANEEL no caso de que ocorra algum evento onde a proteção não atue e seja necessário alguma investigação como forma de se localizar a origem do problema. Assim como serve de subsídios para melhorias futuras a serem realizadas pela concessionária.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo abordou as principais características das subestações de energia elétrica, bem como os principais equipamentos presentes nestas estruturas, onde constatou-se no mesmo que a realização de manutenções em subestações de energia elétrica, principalmente as manutenções conhecidas como preditivas, mostram-se como a principal forma de evitar falhas de operações e de redução de custos. Outrossim, durante a realização deste trabalho foi possível identificar as principais normas que devem ser seguidas e que visam garantir a segurança dos trabalhadores nestes locais.

Assim, diante do exposto, entende-se que a realização deste trabalho permitiu unir em um único tópico, os diversos ensaios e testes que precisam ser realizados para que uma subestação funcione de forma correta e segura, bem como as principais medidas de segurança a serem adotadas. Além disso, a redação deste estudo possibilitou compreender o passo a passo que deve ser seguido quando se inicia a averiguação das condições de funcionamento de uma subestação de energia elétrica, o que servirá para que outros profissionais da área possam utilizar este trabalho como um ponto de partida para a realização de tal tarefa.

É fundamental que se diga que o assunto é amplo demais para que todos os ensaios sejam contemplados num único trabalho de conclusão de curso, as normas versam sobre os métodos, mas sabemos que a prática é coisa muito diferente e, portanto, um único equipamento já tem assunto para inúmeros trabalhos, cada um com um foco diferente.

Como visto na proposta, o trabalho serviu para ampliar os conhecimentos vistos nas disciplinas que tratam dos equipamentos elétricos, tais como instalações elétricas II e instalações elétricas III, bem como a disciplina de Subestações. A parte de ensaios é um tópico a parte e que deve ser baseada principalmente nas normas vigentes, mas principalmente nos manuais dos fabricantes de equipamentos.

REFERÊNCIAS

ABB. **Medium Voltage products, solutions and services.** https://new.abb.com/medium-voltage?_ga=2.79755799.1079572123.1670899839-1613150781.1670899839&_gl=1*r7bvej*_ga*MTYxMzE1MDc4MS4xNjcwODk5ODM5*_ga_46ZFBRSZNM*MTY3MDg5OTgzOS4xLjAuMTY3MDg5OTg0Mi4wLjAuMA.

Acesso em: 30 nov. 2022.

ADANTAS COMERCIAL. **Para-raios de oxido de zinco.** Disponível em: <https://adantascomercial.com.br/produto/para-raios-de-oxido-de-zinco-polimerico-silicone-balestro/>. Acesso em: 15 out. 2022.

Agencia Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. **Número de subestações no Brasil.** Disponível em:

<http://www.consultaesic.cgu.gov.br/busca/dados/Lists/Pedido/Item/displayifs.aspx?List=0c839f31%2D47d7%2D4485%2Dab65%2Dab0cee9cf8fe&ID=1499083&Web=88cc5f44%2D8cfe%2D4964%2D8ff4%2D376b5ebb3bef>. Acesso em: 16 out. 2022.

SILVA, A. M. **Veículo Operado Remotamente Aplicado ao Corte e Controle de Vegetação em Áreas Restritas do Sistema Elétrico de Potência.** Monografia (Pós-graduação) – Especialização em Automação, Controle e Robótica, Faculdade de Tecnologia SENAI, Salvador, 2016.

ALMEIDA, J. C. F. *et al.* **Uma abordagem sobre manutenção preditiva em subestação de potência.** Disponível em:

https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/6623/1/JulioCFA_ART.pdf. Acesso em: 01 nov. 2022.

ÁLVARES, R. C. **Diagnóstico de Falhas em Para-raios Utilizando Termografia.** Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

ANSCHAU, E. H. **Automação do Ensaio de Relação de Transformação em Transformadores de Potência.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Blumenau, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **ABNT NBR 14724:** informação e documentação. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5462-1994:** Confiabilidade e manutenibilidade. Rio de Janeiro: ABNT, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15749:** Medição de resistência de aterramento e de potenciais na superfície do solo em sistemas de aterramentos. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5356-1:** Transformadores de potência Parte 1 – Generalidades. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

BANDEIRA, M. I. da C. **Automação do ensaio de saturação em transformadores de corrente utilizados em sistemas de transmissão de energia elétrica.** Dissertação (Mestrado em Metrologia) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

BARBOSA, P. A. M.; MATTOS, L. B. **Relação entre consumo de energia elétrica e crescimento econômico no Brasil: uma análise a nível setorial.** Disponível em: https://www.anpec.org.br/sul/2021/submissao/files_l/i2-4cdb96673194f50a0e68b021b119b3fa.pdf. Acesso em: 16 out. 2022.

BARBOZA, T. L. Um histórico da manutenção e conceitos sobre sua função. **Revista Marítima Brasileira**, v.138, n.10/12, p.83-87, 2018.

BARROS, R. L.; GREDA, B. F. de. **Cabine Primária:** Subestações de alta tensão de consumidores. São José dos Campos: Erica, 2009.

BARROS, R.; GEDRA, B. F. de. **Cabine Primária.** São Paulo: Érica LTDA., 2011. 42 p.

BECHARA, R. **Análise de Falhas em Transformadores de Potência** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BISPO, R. P. **Importância dos ensaios elétricos nos transformadores de potência.** Monografia (Graduação) - Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2019.

BNAMERICANAS. **Destaque:** mapa das subestações de transmissão de energia do Brasil. 2022. Disponível em: <https://www.bnamericas.com/pt/analise/destaque-mapa-das-subestacoes-de-transmissao-de-energia-do-brasil#:~:text=Hoje%2C%20existem%20772%20subesta%C3%A7%C3%B5es%20em,nas%20regi%C3%B5es%20Sudeste%20e%20Sul>. Acesso em: 01 nov. 2022.

BOLOTINHA, M. **Transformadores de medição de alta e média tensão.** Disponível em: <https://universolambda.com.br/transformadores-de-medicao-de-alta-e-media-tensao/>. Acesso em: 18 out. 2022.

CIARLINI, E. A. **Guia prático de inspeção, manutenção e ensaios em disjuntores de alta tensão.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

CIGRE BRASIL. **Guia de manutenção para transformadores de potência.** Rio de Janeiro: Grupo de Trabalho, 2013.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG. **Acidentes com energia elétrica aumentam no Brasil em 2021 e Cemig orienta como evitá-los.** 2022.

Disponível em: <https://www.cemig.com.br/release/acidentes-com-energia-eletrica-aumentam-no-brasil-em-2021-e-cemig-orienta-como-evita-los/#:~:text=De%20acordo%20com%20a%20publica%C3%A7%C3%A3o,que%20resultaram%20em%20764%20%C3%B3bitos>. Acesso em: 15 out. 2022.

COSTA, M. A. D. da.; LEMOS, H. T. Q. **Estudo da proteção de sobrecorrente de uma subestação de 500 kVA.** Mossoró, 2018. Disponível em:

https://repositorio.ufersa.edu.br/bitstream/prefix/3616/2/MaxADC_ART.pdf. Acesso em: 14 out. 2022.

DANTAS, W.; MINOTTI, C. Principais características das curvas de proteção de disjuntores. **Revista Científica Multidisciplinar**, v.1, n.1, 2021.

DIAS, A. D. **Malhas de aterramento em subestações energizadas: Medições e Análises.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2011.

DREAMSTIME. Isoladores de alta tensão na subestação do transformador. 2022.

Disponível em: <https://pt.dreamstime.com/foto-de-stock-royalty-free-isoladores-de-alta-tens%C3%A3o-na-subesta%C3%A7%C3%A3o-do-transformador-image38685755>. Acesso em: 12 nov. 2022.

DUALIBRE, P. **Subestações:** Tipos, equipamentos e proteção. [S.l.]: Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 1999.

ENEL. **Especificação Técnica no. 0942 cod.: CNC-OMBR-MAT-20-0942-EDBR.**

Disponível em: <https://www.eneldistribuicao.com.br/documentos/CNC-OMBR-MAT-20-0942-EDBR%20-%20Fornecimento%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%20em%20Tens%C3%A3o%20Prim%C3%A1ria%20de%20%20Distribui%C3%A7%C3%A3o%20at%C3%A9%2034,5%20kV.pdf> Acesso em: 16 out. 2022.

ENERGES. **Subestações de manobra.** Disponível em: <https://energes.com.br>. Acesso em: 02 dez. 2022

FINKLER, A. *et al.* Relação do crescimento econômico e consumo de energia elétrica. *In:* Seminário de Iniciação Científica da UNIJUÍ, I, **Anais [...]**, Ijuí: UNIJUÍ, 2016.

FREEPIK. **Isoladores elétricos de alta tensão.** Disponível em:

https://br.freepik.com/fotos-premium/muitos-isoladores-eletricos-de-alta-tensao-na-subestacao-de-energia-fornecimento-de-energia-para-a-comunidade_28317782.htm. Acesso em: 15 nov. 2022.

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

GOSALIA, J. P. **Relay performance testing**. Boston: IEEE Power System Relaying Committee, 1996.

GOVERNO DO BRASIL. **PORTARIA N.º 915, DE 30 DE JULHO DE 2019 (DOU de 31/07/2019 - Seção 1)** - Aprova a nova redação da Norma Regulamentadora n.º 01 - Disposições Gerais. Disponível em:

<https://www.ibp.org.br/personalizado/uploads/2021/05/portaria-seprt-915-2019.pdf>

Acesso em: 15 out. 2022.

GUIA TRABALHISTA. **Nr 10 - instalações e serviços em eletricidade**. Disponível em: <https://www.guiatrabalhista.com.br/legislacao/nr/nr10anterior.htm>. Acesso em: 15 out. 2022.

HARGRAVE, A.; THOMPSON, M. J.; HEILMAN, B. **Beyond the Knee Point**: A Practical Guide to CT Saturation. Spokane: Schweitzer Engineering Laboratories. 2017.

IEEE. **Guide for Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers**. ..., IEEE Std C57. 1991, 19p.

KINDERMANN, G.; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico**. 2 ed. Porto Alegre: Editora Sagra-DC Luzatto, 1992.

LACHMAN, M. F.; WALTER, W.; GUGGENBERG, P. A. On-Line Diagnostics of High-Voltage Bushings and Current Transformers Using the Sum Current Method. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.15, n.1, 2000.

LEÃO, R. **GTD – Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica**. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MAMEDE FILHO, E. M. **Análise da potencialização do uso de ferramentas de visualização 3D no projeto geométrico de rodovias rurais**. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

MAMEDE FILHO, J. **Manual de equipamentos elétricos**. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

MARTINHO, M. B.; MARTINHO, E.; DE SOUZA, D. F. (Org.). **ANUÁRIO ESTATÍSTICO DE ACIDENTES DE ORIGEM ELÉTRICA 2022 – Ano base 2021**. Salto-SP: Abracopel, 2022.

MCDONALD, J. D. **Electric Power Substations Engineering**. 2. ed. Boca Ranton: CRC Press, 2007.

MENDES, D. C. V. P. **Subestações: guia de projeto e estudo de caso**. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, 2018.

MODENA, J.; SUETA, H. E. Aterramento elétrico. **O SETOR ELÉTRICO**, v. 60, n. 2, p. 48-52, 2011.

MOURA, M. V. F. de. **Estudo da saturação de transformadores de corrente**. Dissertação (Curso de Engenharia Elétrica) - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

MUZY, G. L. C. de O. **Subestações elétricas**. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

NISKIER, J. **Manual de instalações elétricas**. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

OLIVEIRA, D. R. D. E. *et al.* **Ensaio de rotina em transformador trifásico**., 2008.

PALLARO, J. A. **Proposta para Projeto de Para-raios de Distribuição em Média Tensão**. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

PAULINO, M. **Ensaio de resistência de isolamento e de rigidez dielétrica**. 2014. Disponível em: https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2014/08/ed-102_Fasciculo_Cap-VII-Manutencao-de-transformadores.pdf. Acesso em: 15 out. 2022.

PEREIRA JUNIOR, P. S. *et al.* Automatização de ensaios em equipamentos de subestações através de uma ferramenta multifuncional capaz de realizar testes em níveis primário e secundário. *In*: ENCONTRO REGIONAL IBERO-AMERICANO DO CIGRE, XVIII., 2019, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: Cigre Brasil, 2019.

PETRUZELLA, F. D. **Eletrotécnica I**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2014.

RAMBO, M. V. H. *et al.* Monitoramento em tempo real de buchas capacitivas de transformadores. *In*: SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XIX, 2007, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: SNPTEE, 2007.

REHTOM ELETROMECHANICA. **Transformador de corrente de média tensão.** Disponível em: <http://www.rehtom.com.br/transformador-corrente-media-tensao-transformadores-correntes-medias-tensoes.php> . Acesso em: 10 dez. 2022.

SANTOS, E. I. R. dos.; GONÇALVES, A. Medição da resistência das conexões enterradas da malha de terra em subestações energizadas. *In: SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, XIX, 2010. Anais [...]* São Paulo: SENDI, 2010. p. 1-8.

SILVA NETO, J.C.S.; LIMA, A.M.G. **Implantação do Controle de Manutenção.** Disponível em: <http://www.mantenimentomundial.com/notas/11controle.pdf>. Acesso em: 15 out. 2022.

SILVA, P. R. C. da. **Avaliação de buchas transformadoras utilizando métodos sem malha.** Dissertação de mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de São João del-Rei, Belo Horizonte, 2021.

SOARES, L. L. **Manutenção de subestações classe 15 kv, procedimentos e ensaios segundo normas aplicáveis da ABNT e MTE.** 2013. 105 f. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

STIRL, T. *et al.* **On-line Condition Monitoring and Diagnosis for Power Transformers their Bushings, Tap Changer and Insulation System – International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis.** Changwon: CMD, 2006.

SULLTEC GERADORES. **Manutenção de subestações.** Disponível em: <https://sulltec.com.br/servicos/manutencao-em-subestacoes-abrigas-em-cabines-de-media-tensao/>. Acesso em 05 dez. 2022.

TAGG, G.F. Measurement of the resistance of physically large earth-electrode systems. **Proc. Inst. Electr. Eng.**, v. 117, n. 11, pp. 2185–2190, 1970.

TAGG, G.F. Measurements of earth electrode resistance with particular reference to earth-electrode Systems Covering a Large Area Proceedings. **IEE**, v.3, n.12, 1964.

TAGG, G.F. **The measurement of an earth electrode resistance, in Earth Resistances.** London: UK: Pitman Pub. Corp., 1964. p.205.

THIELE, M. R. **Projeto de comissionamento de banco de baterias em sistema de emergência de usina termelétrica.** Monografia (Curso de Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.

TURMINA, E. *et al.* Avaliação de impactos ambientais gerados na implantação e operação de subestação de energia elétrica: um estudo de caso em Palhoça, SC. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, Lages, v.17, n.4, p.589-598, 2018.