CARLOS EDUARDO RIBEIRO LOUREIRO

ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA SIMPLIFICADAS

Niterói
2019

CARLOS EDUARDO RIBEIRO LOUREIRO

ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA SIMPLIFICADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Instituição Anhanguera, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

Orientador: Jair Jorge.

Niterói
2019

CARLOS EDUARDO RIBEIRO LOUREIRO

ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA ELÉTRICA SIMPLIFICADAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Instituição Anhanguera, como requisito parcial para a obtenção do título de graduado em Engenharia Elétrica.

BANCA EXAMINADORA

Prof(ª). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(ª). Titulação Nome do Professor(a)

Prof(ª). Titulação Nome do Professor(a)

Niterói, dia de mês de ano

LOUREIRO, Carlos Eduardo Ribeiro. **Aterramento em Subestações de Energia Elétrica Simplificada.** 2019. 29f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Anhanguera, Niterói, 2019.

RESUMO

Observa-se que a condição adversa é quando um circuito ativo toca o corpo do equipamento elétrico. Uma falha de aterramento no equipamento faz com que o potencial do gabinete metálico suba acima do potencial de aterramento "verdadeiro". Sendo assim, o presente estudo teve por objetivo apresentar quais são os critérios de aterramento em subestações simplificadas de energia elétrica. A importância do tema se dá pela oportunidade de evidenciar que os sistemas de aterramento vieram a ser desenvolvidos para proteger indivíduos, animais e materiais contra admissíveis falhas de um determinado sistema. Sobre a metodologia de pesquisa, trata-se de uma revisão literária. A pesquisa tem um aspecto exploratório-explicativo, com características de pesquisa qualitativa. Constatou-se que a Nova Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 15751/2009 exibe as recomendações práticas que necessitam ser levadas em consideração em meio ao projeto da malha de aterramento de uma subestação. Além do mais, observou-se que cuidados especiais precisam ser tidos para o aterramento de estruturas metálicas extensas em todo o perímetro de uma subestação (como tubulações, cercas, linhas de comunicação etc.), visto que as próprias podem transmitir potencialidades de toque perigosos para fora da subestação.

Palavras-Chave: Energia; Fontes Alternativas; Matriz Energética.

LOUREIRO, Carlos Eduardo Ribeiro. **Grounding in Simplified Electric Power Substations.** 2019. 29f. Course Completion Work (Graduation in Electrical Engineering) - Anhanguera, Niterói, 2019.

ABSTRACT

It is observed that the adverse condition is when an active circuit touches the body of the electrical equipment. Failure to ground the equipment causes the enclosure potential to rise above the "true" ground potential. Therefore, the present study aimed to present the grounding criteria in simplified electric power substations. The importance of the theme is given by the opportunity to demonstrate that grounding systems have been developed to protect individuals, animals and materials against the inadmissible failures of a given system. About the research methodology, this is a literary review. The research has an exploratory-explanatory aspect, with characteristics of qualitative research. It was found that the New Brazilian Regulatory Norm - NBR 15751/2009 shows the practical recommendations that need to be taken into account in the design of the substation grounding grid. Furthermore, it has been observed that special care must be taken to ground extensive metal structures around the perimeter of a substation (such as pipes, fences, communication lines, etc.), as they may transmit harmful touch potential out of the substation.

Keywords: Energy; Alternative Sources; Energy Matrix.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWG - *American Wire Gauge*

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

GW - *gigawatt*

IEC - *International Electrotechnical Commission*

IEEE - Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos

ISO - *International Organization for Standardization*

kV - *quilovolt*

LED - *Light Emitting Diode*

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

RAM - *Random Access Memory*

SI - Sistema Internacional de Unidades

SIN - Sistema Interligado Nacional

USB - *Universal Serial Bus*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 8

2 A ENERGIA ELÉTRICA 10

2.1 CONCEITO **10**

2.2 HISTÓRIA **11**

2.3 EVOLUÇÃO **13**

3 SUBESTAÇÕES DE ENERGIA 16

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO **16**

3.2 ASPECTOS BÁSICOS **18**

3.3 OBJETIVOS **19**

4 ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA 21

4.1 O ATERRAMENTO ELÉTRICO **21**

4.2 O ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES **22**

4.3 PARÂMETROS TÉCNICOS E ASPECTOS FUNCIONAIS **23**

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS 26

REFERÊNCIAS 28

1 INTRODUÇÃO

O sistema de aterramento da subestação contém uma grade (tapete de terra) formada por condutores horizontais enterrados. O sistema de aterramento na subestação é importante. As funções dos sistemas de aterramento ou do tapete de aterramento são as primeiras a garantir a segurança do pessoal nas subestações contra possíveis choques elétricos. Também, fornece a conexão de aterramento para conectar os neutros do enrolamento do transformador conectado à terra (aterramento neutro). E finalmente, para descarregar as sobretensões dos fios aéreos suspensos ou dos mastros relâmpagos para a terra.

A importância do tema se dá pela oportunidade de evidenciar que os sistemas de aterramento vieram a ser desenvolvidos para proteger indivíduos, animais e materiais contra admissíveis falhas de um determinado sistema. Tais falhas podem ser desde uma pequena evasão de corrente até um arco elétrico manifesto que pode vir a afetar negativamente um equipamento e acarretar em um incêndio em uma circunstância grave.

Como problema da pesquisa, observa-se que a condição adversa é quando um circuito ativo toca o corpo do equipamento elétrico. Uma falha de aterramento no equipamento faz com que o potencial do gabinete metálico suba acima do potencial de aterramento "verdadeiro". E para evitar acidentes nos casos acima, é necessário um aterramento adequado. Um aterramento inadequado resulta em maior potencial e também resulta em uma limpeza atrasada da falha. No entanto, existem alguns padrões que orientam o aterramento da subestação. Sendo assim, tem-se a seguinte questão problema da pesquisa: quais são os critérios de aterramento em subestações de energia elétrica simplificadas?

Portanto, o presente estudo teve por objetivo apresentar quais são os critérios de aterramento em subestações simplificadas de energia elétrica. Como objetivos específicos, buscou-se abordar a energia elétrica; as subestações de energia; e o aterramento em subestações de energia.

Sobre a metodologia de pesquisa, trata-se de uma revisão literária que tem como objetivo abordar e apresentar os pensamentos dos autores consultados sobre o tema proposto no estudo para em seguida chegar aos objetivos propostos no presente estudo. Para tanto, foram utilizadas publicações e artigos eletrônicos provenientes de bibliotecas virtuais. Como critérios de seleção das obras, utilizou-se

apenas obras publicadas em inglês e português entre os anos de 1990 e 2018. A pesquisa tem um aspecto exploratório-explicativo, com características de pesquisa qualitativa. Os descritores usados na busca eletrônica foram: Energia; Fontes Alternativas; Matriz Energética.

2 A ENERGIA ELÉTRICA

Neste capítulo, aborda-se a energia elétrica, mostrando seus principais conceitos e definições, breve contexto histórico de seu desenvolvimento desde o início, bem como sua evolução de um modo geral no planeta com o passar do tempo.

2.1 CONCEITO

A energia elétrica trata-se de uma taxa por unidade de tempo onde a energia elétrica advém a ser transferida por um circuito elétrico. Neste contexto, o Sistema Internacional de Unidades (SI) de potência é o *watt*, sendo então um *joule* por segundo. A energia elétrica comumente é gerada através de geradores elétricos, porém, igualmente pode ser provida por fontes como baterias elétricas. Comumente, ela é provida para organizações e lares pela indústria de energia elétrica por meio de uma rede elétrica. A energia elétrica é comumente comercializada pelo *kilowatt*-hora, que trata-se do produto da potência em *quilowatts* multiplicada pelo tempo de operação em horas (MAMEDE, 2005).

Assim, as empresas fornecedoras de energia elétrica medem a energia aproveitando um medidor de eletricidade que conserva um total de energia elétrica entregue ao cliente. A energia elétrica providencia uma maneira de baixa entropia de energia, podendo ser transportada por compridas distâncias e transformada em demais meios de energia, tais como movimento, luz ou calor com elevada eficácia energética (BOMBASSARO, 2009).

Por conseguinte, a energia elétrica, bem como a potência mecânica, trata-se da taxa de trabalho que é medida em *watts*, sendo representada pela letra P. A expressão potência é utilizada de forma coloquial para constituir energia elétrica em *watts*. Nesta ocasião, a energia elétrica é convertida em demais maneiras de energia quando as cargas elétricas advêm por uma diferença de potencialidade elétrica (tensão) que acontece em elementos elétricos em circuitos elétricos. No contexto da energia elétrica, os elementos de um circuito elétrico podem ser divididos em duas categorias: dispositivos passivos ou cargas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005).

Quando as cargas elétricas se movem por meio de uma diferença de potencialidade de uma voltagem mais elevada para uma mais baixa, ou seja,

quando a corrente convencional (carga positiva) se movimenta do terminal positivo (+) para o terminal negativo (-), a energia potencial das cargas, em razão da tensão entre os terminais, é transformada em energia cinética no dispositivo. Estes dispositivos são denominados de componentes passivos ou cargas; pois eles “consomem” energia elétrica do circuito, transformando-a em demais maneiras de energia, como trabalho mecânico, calor, luz etc. (MARTINS, 2003).

A distribuição de energia elétrica pode ser vista como uma fase final na entrega de energia elétrica; em que há o transporte de eletricidade do sistema de transmissão para os consumidores finais. Nesta conjuntura, as subestações de distribuição conectam-se ao sistema de transmissão e amainam a tensão de transmissão para média tensão entre 2 *quilovolt* (kV) e 35 kV com o emprego de transformadores. Assim, as linhas de distribuição primária transportam essa energia de média tensão para os transformadores de distribuição localizados adjuntos as instalações do cliente (FUGIMOTO, 2010).

A energia elétrica trata-se de uma taxa por unidade de tempo onde a energia elétrica é transferida através de um circuito elétrico. Deste modo, a unidade SI de potência trata-se do *watt*, sendo um *joule* por segundo. A energia elétrica comumente é gerada por meio de geradores elétricos, porém, igualmente pode ser provida por fontes tais como baterias elétricas (BOMBASSARO, 2009).

Sendo assim, comumente ela é provida para organizações, bem como lares familiares pela indústria de energia elétrica por meio de uma rede elétrica de distribuição de energia. A energia elétrica é comumente comercializada pelo *kilowatt*-hora, que trata-se do produto da potência em *quilowatts* multiplicado pelo tempo de atividade em horas (MAMEDE, 2005).

Portanto, as concessionárias de energia elétrica medem a energia utilizando um medidor de eletricidade, que conserva um total de energia elétrica entregue ao cliente. A energia elétrica providencia uma maneira de baixa entropia de energia, e pode vir a ser transportada por amplas distâncias e transformada em demais meios de energia, como movimento, luz ou calor com elevada eficácia energética (BOMBASSARO, 2009).

2.2 HISTÓRIA

Os princípios básicos da geração de eletricidade foram descobertos em meio

a década de 1820 e começo de 1830, pelo cientista britânico Michael Faraday (1791-1867). Sua metodologia básica ainda é aproveitada, em que a eletricidade é causada pelo movimento de um *loop* de fio ou disco de cobre entre os polos de um ímã. Para as empresas fornecedoras de energia elétrica, trata-se do primeiro processo na entrega de eletricidade aos consumidores. Os demais processos tais como armazenamento e distribuição são comumente concretizados pela indústria de energia elétrica (FUGIMOTO, 2010).

No ano de 1870, a produção mercantil de eletricidade principiou com a vinculação do dínamo à turbina hidráulica. No ano de 1870, a produção mecânica de energia elétrica principiou na Segunda Revolução Industrial, e criou invenções utilizando a energia cujos principais colaboradores foram Thomas Alva Edison (1847-1931) e Nikola Tesla (1856-1943). Antes, a única forma de produzir eletricidade era através de reações químicas ou utilizando células de bateria, e a única utilização prática de eletricidade era para o telégrafo (MARTINS, 2003).

A geração de eletricidade em centrais elétricas principiou no ano de 1882, quando uma máquina a vapor que conduzia um dínamo na Estação *Pearl Street* causou uma corrente contínua que manteve a iluminação pública em *Pearl Street*, na cidade de Nova Iorque. A nova tecnologia foi então velozmente adotada por diversas cidades e por todo o planeta, que mudaram suas luzes de rua alimentadas a gás para energia elétrica, e logo em seguida, luzes elétricas seriam aproveitadas em prédios públicos, em organizações, bem como para o transporte público, tais como bondes e trens (PAULINO, 2006).

Sendo assim, as primeiras usinas de energia utilizaram água ou carvão; e, em seguida, incidiu a ser utilizadas inúmeras fontes de energia, tais como carvão, energia nuclear, gás natural, hidrelétricas, geradores eólicos e petróleo, assim como energia solar, energia das marés e fontes geotérmicas. A utilização de linhas de energia e postes de energia vem sendo expressivamente essencial na distribuição de eletricidade (OLIVEIRA, 2009).

Em 1887, Heinrich Hertz (1857-1894) descobriu que eletrodos iluminados com luz ultravioleta criam faíscas elétricas mais facilmente. Em 1905, Albert Einstein (1879-1955) publicou um artigo que explicava os dados experimentais do efeito fotoelétrico como sendo o resultado da energia da luz sendo transportada em pacotes quantificados discretos, energizando elétrons. Esta descoberta levou à revolução quântica (PEREIRA; VENTURA, 2014).

Neste contexto, Einstein recebeu o Prêmio Nobel de Física em 1921 por sua descoberta da lei do efeito fotoelétrico. O efeito fotoelétrico também é empregado em fotocélulas, como pode ser encontrado em painéis solares, e é frequentemente usado para fazer eletricidade comercialmente (OLIVEIRA, 2009).

Em um componente de estado sólido, a corrente está confinada a elementos sólidos e compostos projetados especificamente para comutá-los e amplificá-los. O fluxo de corrente pode ser entendido de duas formas: como elétrons carregados negativamente, e como deficiências elétricas carregadas positivamente chamadas de furos. Essas cargas e buracos são entendidos em termos de física quântica. O material de construção é, na maioria das vezes, um semicondutor cristalino (BOMBASSARO, 2009).

O dispositivo de estado sólido entrou em ação com a invenção do transistor em 1947. Dispositivos comuns de estado sólido incluem transistores, *chips* de microprocessador *e Random Access Memory* (RAM). Um tipo especializado de RAM chamado *flash* RAM é usado em unidades *flash Universal Serial Bus* (USB) e, tempos depois, em *drives* de estado sólido para substituir os discos rígidos de disco magnético de rotação mecânica (OLIVEIRA, 2009).

Dispositivos de estado sólido tornaram-se predominantes nas décadas de 1950 e 1960 durante a transição de tubos de vácuo para diodos semicondutores, transistores, circuito integrado e diodo emissor de luz *Light Emitting Diode* (LED) (PEREIRA; VENTURA, 2014).

2.3 EVOLUÇÃO

No século passado, as economias de escala associadas com grandes tecnologias de geração centralizada incentivaram a integração vertical e dirigiu a redução do custo da eletricidade, fomentando o acesso e fornecido para serviço elétrico confiável entregue por um único utilitário em uma determinada região. As cargas iniciais nesses primeiros sistemas de energia foram principalmente iluminação, seguido de perto por motores elétricos com cargas que eram bem adequadas para alimentação de Corrente Alternada (CA) (PREMALATHA, 2014).

No entanto, nas últimas décadas, a explosão no número de computadores, microprocessadores e sistemas de telecomunicações, forneceram cargas que são inerentemente adequados para Corrente Contínua (CC). Esses dispositivos exigem

melhor qualidade de energia do que luzes e motores, onde os retificadores (que convertem CA para CC) nos sistemas muitas vezes produzem desafios de qualidade de energia (PEREIRA; VENTURA, 2014).

No mesmo tempo, os recursos energéticos distribuídos como painéis solares fotovoltaicos e baterias fornecem fontes de energia que também são inerentemente CC. Para evitar a perda da concorrência para servir esse novo tipo de carga, as concessionárias podem precisar adaptar-se oferecendo novos modelos de entrega de energia, como as sobreposições de micro rede CC no topo de seus sistemas de distribuição de corrente alternada (PREMALATHA, 2014).

Para tanto, legislaturas e órgãos reguladores desempenham um importante, se não essencial, papel na redefinição do ambiente regulatório que define os incentivos e estrutura para modelos de negócios de serviços públicos. Todavia, o regime regulador enfrenta prioridades conflitantes (HODGE, 2017).

Ele precisa ser flexível o suficiente para não impedir a inovação exigida e, ao mesmo tempo, oferecer um ambiente estável e previsível que continuará a estimular o investimento. Há ainda o perigo de o Governo usar a regulamentação para entregar um resultado "escolhido" em vez de facilitar a inovação e o investimento para atingir os objetivos acordados (PREMALATHA, 2014).

De acordo com Hodge (2017, p. 36), talvez, seja preciso adotar um regime que “enfatize mais os principais objetivos, princípios e estruturas, ao mesmo tempo em que se introduza incentivos e discrição para permitir a adaptação quando necessário”.

Neste contexto, a maior parte do aumento na geração de energia global em 2017 ocorreu na Ásia, com a China contribuindo para metade do crescimento devido à alta demanda combinada com o rápido desenvolvimento de capacidades de geração, seguido pela Índia e Japão (HODGE, 2017).

Teve-se também a geração de energia contratada nos Estados Unidos contra a demanda menor de eletricidade, mas, aumentou no Canadá e na União Europeia em menor grau. Estagnou na Rússia, mas, também aumentou na Turquia e no Oriente Médio, devido à crescente geração no Irã (PREMALATHA, 2014).

De acordo com a Administração de Informações de Energia dos Estados Unidos, a capacidade de geração de energia dos EUA de usinas de ciclo combinado superou a das usinas movidas a carvão, tornando-se então a tecnologia com maior capacidade nos Estados Unidos em 2018. Em janeiro de 2019, a capacidade

instalada totalizou 264 *gigawatt* (GW), contra 243 GW da capacidade de energia a carvão. Desde 2015, cerca de 40 GW de capacidade de energia a carvão foram desativados, nenhuma nova capacidade de carvão foi comissionada, enquanto a capacidade total aumentou em cerca de 30 GW (ASM LATIN, 2019).

Usinas termoelétricas a gás superaram o carvão como principal recurso de capacidade há mais de uma década, mas, esta é a primeira vez que uma única tecnologia de geração a gás supera o carvão. No final de 2018, as usinas de energia respondiam por mais da metade de toda a capacidade de geração de gás natural nacional, mas, também forneciam quase 90% da geração total de gás natural, refletindo um fator de capacidade maior do que a combustão de gás natural (WILSON; GRUBLER, 2019).

3 SUBESTAÇÕES DE ENERGIA

Neste capítulo, aborda-se a temática das subestações de energia, realizando aqui uma breve contextualização sobre o tema, apresentando seus aspectos básicos e principais, bem como seus principais objetivos inerentes ao sistema de energia elétrica.

3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

Inicialmente, compete dizer que, em projetos de geração distribuída, tais como os parques eólicos, por exemplo, pode ser preciso que haja uma subestação coletora. Essa é idêntica com uma subestação de distribuição, ainda que o fluxo de energia fique na direção contrária de diversas turbinas eólicas para a rede de transmissão (SOUZA, 2010).

Comumente, para economia de construção, o sistema coletor atua por volta de 35 Kv, e a subestação coletor alarga a tensão para uma tensão de transmissão para a rede. A subestação coletora igualmente pode prover uma correção do fator de potência, caso seja preciso, medição e controle do parque eólico. Em certos casos, uma subestação coletora igualmente pode possuir uma estação conversora (FRANÇA, 2012).

As subestações coletoras igualmente existem em locais em que diversas usinas térmicas ou hidrelétricas de potência de saída comparável se encontram pelas adjacências. Exemplos para estas subestações são Brauweiler, na Alemanha, e Hradec, na República Tcheca, em que a energia é recolhida em usinas adjuntas. Portanto, caso nenhum transformador seja preciso para ampliar a tensão para o nível de transmissão, a subestação trata-se de uma estação de comutação (SOUZA, 2010).

Já as subestações conversoras, estas podem estar conexas com plantas conversoras, corrente de tração ou redes não síncronas interligadas. Essas estações possuem dispositivos eletrônicos de energia para mudar a frequência da corrente, ou então transformar de alternada para corrente contínua, ou também reversa. Antes, conversores rotativos modificavam de frequência para interligar dois sistemas; entretanto, estas subestações se tornaram raras (MUZY, 2012).

De acordo com Silva Filho (2009, p. 42), “uma estação de comutação trata-se

de uma subestação sem a existência de transformadores, que opera apenas em um único nível de tensão". Por vezes, as estações de comutação são aproveitadas como estações coletoras e de distribuição. Por vezes, elas são aproveitadas também para alternar a corrente para linhas de *backup* ou para igualar circuitos em caso de surgimento de falha.

As subestações de energia operam para a distribuição da energia elétrica. Antes de chegar as casas, a eletricidade percorre um sistema de transmissão que começa nas usinas e incide por estas estações, onde os equipamentos chamados de transformadores conseguem o aumento ou a diminuição da tensão. Quando aumentam a tensão elétrica, os transformadores evitam que exista perda descomedida de energia no decorrer do caminho. Quando amainam a tensão, já nos centros urbanos, aceitam a distribuição da energia por toda a cidade (TOSSI; STAROSTA, 2013).

Assim, nota-se que as subestações operam como pontos de entrega de energia para os consumidores. E para se tornar adequada para o consumo, a energia incide por transformadores menores, alojados nos postes das ruas. Eles atenuam ainda mais a tensão que é recebida nas residências e empresas. O fornecimento de energia é concretizado por meio de um extenso e implexo sistema de subestações, linhas de transmissão e usinas que formam o Sistema Interligado Nacional (SIN) (MUZY, 2012).

Uma subestação pode ser vista como um dos elementos que formam um sistema elétrico de geração, transmissão e distribuição de energia. Nesta ocasião, as subestações demudam a voltagem de alta para baixa, ou ao contrário, ou concretizam qualquer uma das diferentes funções capitais (TOSSI; STAROSTA, 2013).

Entre a estação geradora e o consumidor, a energia elétrica pode decorrer através de várias subestações em caracterizados níveis de tensão. Uma subestação pode ter transformadores para alterar os níveis de tensão entre elevadas tensões de transmissão e menores tensões de distribuição, ou na interface de duas tensões de transmissão dessemelhantes (FRANÇA, 2012).

Tais subestações podem ser geridas e operadas através de uma concessionária de energia elétrica, ou podem pertencer a uma organização industrial ou comercial. Habitualmente, as subestações são independentes. A expressão subestação vem do período antes ao sistema de distribuição vir a ser uma ampla

rede (TOSSI; STAROSTA, 2013).

À medida em que as centrais de geração vieram a ficar maiores, usinas menores foram decompostas em estações de distribuição, ganhando seu fornecimento de energia de uma usina maior ao contrário de empregar seus próprios geradores. As primeiras subestações foram conectadas a apenas uma usina, onde os geradores foram acomodados e eram subsidiárias daquela usina (MUZY, 2012).

De acordo com Tossi e Starosta (2013, p. 44), “as subestações de transmissão podem diferençar-se de simples a implexas. Uma pequena estação de comutação, por exemplo, pode ser pouco mais que um barramento e mais alguns disjuntores”.

As grandes subestações de transmissão podem acobertar uma extensa área com múltiplos níveis de tensão, diversos disjuntores, e uma espaçosa quantidade de equipamentos de proteção e controle (transformadores de tensão e corrente, e relés). Subestações mais modernas podem ser implementadas usando padrões internacionais, tais como o padrão *International Electrotechnical Commission* (IEC) 61850, por exemplo (MUZY, 2012).

Portanto, uma subestação de distribuição é apropriada de transferir energia do sistema de transmissão para o sistema de distribuição de uma verificada área. Apesar disso, não é econômico ligar diretamente os consumidores de eletricidade à rede de transmissão principal, afora quando eles aproveitem amplas quantidades de energia, de forma que a estação de distribuição atenue a voltagem para um plano adequado para distribuição local (FRANÇA, 2012).

3.2 ASPECTOS BÁSICOS

Uma estação de comutação igualmente pode ser versada como um pátio de comando, onde essas são frequentemente situadas inteiramente adjacentes ou conexas com uma estação de energia. Nesse caso, os geradores da usina de energia providenciam energia para o pátio no barramento do gerador, em um lado do pátio, e as linhas de transmissão recebem sua energia de um barramento de alimentação, do outro lado do pátio (SILVA FILHO, 2009).

Neste contexto, um papel essencial exercido por uma subestação, trata-se exatamente da comutação, que se trata da conexão e desconexão de linhas de transmissão ou demais elementos no sistema. Assim, as ocorrências de troca

podem ser planejadas ou não planejadas (CASSADO, 2015).

Uma linha de transmissão – ou outro membro – pode necessitar de uma desenergização para posterior manutenção ou para nova construção, por exemplo, acrescendo ou extraindo uma linha de transmissão, ou também um transformador. Conforme Tossi e Starosta (2013, p. 45):

> Para conservar a confiabilidade do provimento, as organizações propendem conservar o sistema atuando em meio a manutenção. Todo o trabalho a ser realizado, desde o teste costumeiro até o acrescimento de subestações completamente novas, precisa ser realizado conservando todo o sistema em operação.

Deste modo, um sistema eficaz para gerenciar a integridade e a confiabilidade dos ativos, trata-se da barreira mais importante contra falhas em instalações industriais complexas, como a infraestrutura de serviços públicos de eletricidade. Em todas as concessionárias de energia elétrica, os ativos estão sendo levados aos seus limites com o aumento de cargas em infraestrutura envelhecida e expectativas aprimoradas de confiabilidade (MUZY, 2012).

Os proprietários-operadores estão lidando com as pressões conflitantes de minimizar os custos operacionais para aumentar a lucratividade enquanto demonstram altos padrões de governança de ativos e cumprimento das obrigações regulatórias. Portanto, para ter sucesso, os operadores proprietários precisam de uma estratégia melhor para gerenciar e manter seus ativos complexos – uma estratégia que suporta decisões mais econômicas e impactantes (CASSADO, 2015).

Neste contexto, de acordo com Silva Filho (2009, p. 49), tem-se o gerenciamento de desempenho de ativos, “que adveio a ganhar uma maior aceitação no mercado como uma nova forma de atender a esses requisitos conflitantes”.

O gerenciamento de desempenho de ativos descreve o subconjunto de uma estratégia de gerenciamento de ativos que relaciona abordagens de operações em oposição a abordagens convencionais reativas ou baseadas em tempo. Também, define uma categoria de serviços e produtos de *software* que podem ser aplicados taticamente para planejar e executar um programa de melhoria da integridade e confiabilidade dos ativos (DOS SANTOS, 2016).

3.3 OBJETIVOS

Os princípios do gerenciamento de desempenho de ativos também estão alinhados diretamente com a nova norma *International Organization for Standardization* - ISO 55000, que define um novo marco para as melhores práticas de gerenciamento de ativos (MUZY, 2012).

Esta norma chamou a atenção de proprietários e operadores de energia elétrica, que estão igualmente interessados em saber como os seus ativos estão sendo bem gerenciados. Muitas operadoras-proprietárias de infraestrutura estão contratando consultores para ajudá-los a entender onde, na escala de maturidade do gerenciamento de ativos, eles residem e o que precisam fazer para chegar mais perto da ISO 55000 (MATTOS, 2013).

Sabe-se que a principal função do sistema de energia é fornecer energia para os clientes de forma adequada e eficiente. Na situação normal, o sistema de energia é exigido para ser altamente eficiente e seguro. Se alguma parte do sistema falhar, a quantidade de energia entregue pode ser afetada, e grandes perdas econômicas podem ser induzidas, sem mencionar os problemas de segurança que podem seguir uma falha. Consequentemente, a avaliação da confiabilidade do sistema de energia é de importância significativa (GEBRAN, 2014).

Segundo Carreira (2010, p. 29), a confiabilidade que se concentra na adequação do sistema é definida como “confiabilidade estática, enquanto a confiabilidade que se concentra na segurança do sistema é chamada dinâmica de confiabilidade”. A maioria dos estudos sobre a confiabilidade do sistema de energia, especialmente a subestação, estão no campo de confiabilidade estática, ou seja, consideram apenas a conectividade o sistema, o que não é algo realista.

Distúrbios como flutuação de carga e interrupções de componentes existem no mundo real. Assim, para envolver o comportamento dinâmico do sistema, como a reação de proteção após falha de um componente, avaliação dinâmica de confiabilidade deve ser aplicada (MUZY, 2012).

No entanto, devido à complexidade do sistema de proteção do sistema de potência, existem apenas alguns estudos sobre avaliação da confiabilidade dinâmica. A confiabilidade dos sistemas de energia depende principalmente de três fatores: o incorreto *design*, instalação incorreta, e deterioração do serviço (MATTOS, 2013).

4 ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES DE ENERGIA

Neste capítulo, aborda-se a prática do aterramento em subestações de energia, mostrando aqui como se dá o aterramento elétrico de um modo geral, o aterramento feito em subestações de energia, bem como os parâmetros técnicos e aspectos funcionais.

4.1 O ATERRAMENTO ELÉTRICO

Em engenharia elétrica, terra é o ponto de referência em um circuito elétrico a partir do qual as tensões são medidas, um caminho de retorno comum para a corrente elétrica, ou uma conexão física direta com a terra. Os circuitos elétricos podem ser conectados ao terra por várias razões (ROCHA, 2007).

Nos equipamentos alimentados pela rede, as peças de metal expostas são conectadas ao terra de forma que, devido a condições de falha, uma conexão de tensão de linha ocorre em qualquer dessas partes condutoras, onde o fluxo de corrente será tal que qualquer equipamento de proteção instalado contra sobrecarga ou "vazamento" operará e desconectará a tensão da linha (CREDER, 2007).

Isso é feito para evitar danos que resultem no contato do usuário com qualquer tensão perigosa em uma situação em que o usuário possa, ao mesmo tempo, entrar em contato com um objeto no potencial terra. Em sistemas de distribuição de energia elétrica, um condutor de proteção é uma parte essencial da segurança fornecida pelo sistema de aterramento (ROCHA, 2007).

A conexão ao terra também limita o acúmulo de eletricidade estática ao manusear produtos inflamáveis ou dispositivos sensíveis a eletricidade estática. Em alguns circuitos de transmissão de energia, a própria terra pode ser usada como um condutor do circuito, economizando o custo de instalação de um condutor de retorno separado (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Para fins de medição, o terra serve como uma referência potencial (razoavelmente) constante contra a qual outros potenciais podem ser medidos. Um sistema de aterramento elétrico deve ter uma capacidade de transporte de corrente apropriada para servir como um nível de referência de tensão zero adequada. Na teoria do circuito eletrônico, um "terreno" é geralmente idealizado como uma fonte infinita ou sumidouro de carga, que pode absorver uma quantidade ilimitada de

corrente sem alterar seu potencial (KINDERMANN, 2011).

De tal maneira, onde uma ligação à terra real tem uma resistência significativa, a aproximação do potencial zero não é mais válida. Podem ocorrer tensões parasitas ou efeitos de potencial de terra, o que pode criar ruído nos sinais ou, se for grande o suficiente, produzirá um risco de choque elétrico (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Portanto, o uso do termo terra é tão comum em aplicações elétricas e eletrônicas que os circuitos em dispositivos eletrônicos portáteis tais como telefones celulares e tocadores de mídia, bem como circuitos em veículos, podem ser mencionados como tendo uma conexão "terra" sem qualquer conexão real com a terra (KINDERMANN, 2011).

Geralmente, esse é um condutor grande conectado a um lado da fonte de alimentação (como o "plano de terra" em uma placa de circuito impresso) que serve como o caminho de retorno comum para a corrente de muitos componentes diferentes no circuito (CREDER, 2007).

4.2 O ATERRAMENTO EM SUBESTAÇÕES

A confiabilidade da subestação é importante para a rápida limpeza de falhas, possibilitada pelo bom aterramento, melhora a segurança e a confiabilidade geral de um sistema elétrico. Portanto, a confiabilidade da subestação deve ser tão "integrada" quanto possível, devido aos altos níveis de corrente de falta disponíveis e à ocorrência improvável de inspeções de aterramento de acompanhamento. Os condutores devem ser grandes o suficiente para lidar com quaisquer falhas previstas sem fusão (derretimento) (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

A falha em usar o tempo de falha adequado nos cálculos de projeto cria um alto risco de condutores derretidos. Por exemplo, um condutor 4/0 *American Wire Gauge* (AWG) pode suportar 42.700A por 0.5 segundo antes da fusão. No entanto, esse mesmo condutor pode suportar apenas 13.500A por 5s. O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) sugere o uso de 3,0 segundos para subestações de menor porte. Esse tempo é idêntico à classificação de curto prazo de grande parte dos painéis (ROCHA, 2007).

As vinculações entre os condutores e a rede principal, bem como entre a grade e as hastes de aterramento, se mostram essenciais em relação aos próprios

condutores na manutenção de uma passagem constante de baixa resistência ao solo. Frente a isto, precisa-se considerar o tipo de ligação que a conexão estabelece com o condutor ou a haste de aterramento, bem como as limitações de temperatura (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

As conexões de aterramento mais usadas são as do tipo de pressão mecânica (aparafusada, de compressão e cunha) e soldadas de forma exotermica. As conexões do tipo pressão geram um ajuntamento mecânico entre o condutor e o conector. Tal ajuntamento conserva os condutores no espaço ou os comprime, causando, portanto, um contato de superfície com os fios que estão expostos. O procedimento exotérmico liquefaz então os extremos do condutor para compor assim um ajuntamento molecular entre todos os fios existentes no condutor (ROCHA, 2007).

4.3 PARÂMETROS TÉCNICOS E ASPECTOS FUNCIONAIS

Limites de temperatura são considerações importantes. A eficiência com que uma conexão leva a corrente indica quão bem ela manterá baixa resistência. O IEEE classifica os limites máximos de temperatura permitidos para conexões de tipo de pressão e soldadas. O IEEE fornece informações adicionais (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

A extensão, a quantidade e a colocação das hastes de aterramento atingem negativamente a resistência da direção para o aterramento. Cada duplicação da extensão da barra de aterramento reduz a resistividade de 45%, caso se estiver trabalhando com condições de solo uniformes. Geralmente, as condições do solo não são uniformes, portanto, é fundamental alcançar dados concisos de resistividade medindo a resistividade da haste de aterramento com aparelhos adequados (ROCHA, 2007).

Assim, para uma maior eficácia, as hastes não podem ser postas mais próximas do que a extensão da haste. Comumente, isto se dá em dez pés. Cada haste compõe uma camada eletromagnética em volta dela, e quando as hastes se encontram mais chegadas, as camadas verdadeiramente intervêm umas nas outras (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Por outro lado, quatro hastes colocadas a 20 pés de distância reduzirão a resistividade em 81% sobre uma haste e usarão apenas 80 pés de condutor. Além

disso, o espaçamento de 20 pés usa apenas 4% dos imóveis consumidos pelo espaçamento de 100 pés (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

A limitação de etapas e o potencial de contato com valores seguros em sua subestação é vital para a segurança dos funcionários. O potencial de degrau é a diferença de voltagem entre os pés de uma pessoa, e é causada pelo gradiente de dissipação de uma falta que entra na terra (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Apenas 30 polegadas do ponto de entrada, a voltagem normalmente será reduzida em 50%. Por exemplo, uma falha de 1000A em um sistema de aterramento de 5 ohms entrará na terra a 5000V. Então, a 30 polegadas de distância, menor que a distância de uma etapa normal, existirá um potencial fatal de 2500V (ROCHA, 2007).

A potencialidade de toque concebe o próprio risco principal, menos pela potencialidade que há entre a mão do indivíduo, bem como os seus pés. Todavia, quando do possível caminho vir a cruzar o sítio do braço e do coração, ao oposto das extremidades inferiores, o risco de lesão ou morte se mostra maior (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Em ambas as situações, o potencial essencialmente pode ser eliminado por uma manta de segurança de malha de arame equipotencial instalada abaixo do nível do solo. Conectado à rede de aterramento principal e qualquer interruptor ou equipamento que um trabalhador possa tocar, uma malha equipotencial será equalize a voltagem ao longo do caminho do trabalhador e entre o equipamento e seus pés. Com a diferença de tensão (potencial), assim, essencialmente eliminada, o risco para o pessoal é praticamente eliminado também (ROCHA, 2007).

Um tapete de segurança de rede composto de arame equipotencial se mostra comumente produzido com fio de cobre para compor um cabo de malha. Demais dimensões de malha se encontram disponíveis no mercado. E para assegurar a assiduidade na malha, todos os cruzamentos de fio devem ser soldados por meio de uma liga de prata. Interfaces entre seções de malha, e entre a malha e a rede de aterramento principal, necessitam ser realizadas de maneira a prover uma conexão constante de elevada resistência e baixa resistência (KINDERMANN; CAMPAGNOLO, 2011).

Todavia, como é quase impossível isolar uma estrutura metálica de sua fundação, o uso de terras *Ufer* aumentou significativamente. Os aterros de *Ufer* utilizam a base de concreto de uma estrutura e o aço do edifício como um eletrodo

de aterramento. Mesmo que os chumbadores não estejam diretamente conectados às barras de reforço (vergalhões), sua proximidade e a natureza semicondutora do concreto fornecerão um caminho elétrico (ROCHA, 2007).

Uma corrente de falta alta (sobretensão relâmpago ou falha de aterramento pesado) pode transformar a umidade no concreto em vapor. Este vapor, tentando expandir para 1800 vezes seu volume original, produz forças que podem rachar ou danificar o concreto. Em uma instalação real, um grande utilitário usava apenas os rodapés para aterrar eletrodos em uma linha de 765kV. Uma posterior inspeção encontrou 90 fundações com fraturas, algumas sendo severas (CREDER, 2007).

A presença de até mesmo uma pequena quantidade de corrente contínua causará a corrosão da barra. Como o aço corroído se expande para mais de duas vezes seu volume original, essa expansão cria forças extremamente grandes no concreto. Embora o vazamento de CA não cause corrosão, a terra retificará uma pequena porcentagem da CA para CC. Em situações em que os chumbadores não são colados ao vergalhão, o concreto pode se desintegrar no caminho (ROCHA, 2007).

Para reduzir os danos do concreto, deve-se limitar a corrente de curta duração ou fornecer um caminho metálico do vergalhão através do concreto para um eletrodo externo. Esse eletrodo externo deve ser dimensionado e conectado para proteger a integridade do concreto (CREDER, 2007).

Portanto, o projeto adequado dos aterramentos do Ufer fornece conexões entre todos os membros de aço na fundação e um ou mais caminhos metálicos para uma haste de aterramento externa ou grade de aterramento principal. Isto dá às falhas um caminho de baixa resistência através do concreto para a terra (ROCHA, 2007).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo teve por objetivo apresentar quais são os critérios de aterramento em subestações simplificadas de energia elétrica. Desta maneira, concluiu-se que os critérios são os seguintes: precisam ser aterrados todos os para-raios e tanques dos transformadores, religadores, reguladores de tensão, capacitores e chaves; o condutor neutro precisa ser aterrado cerca de cada 300 metros e não ser descontínuo; não pode existir um ponto de circuito secundário separado mais de 200 metros em relação a um aterramento; todo final de rede primária e secundária precisa possuir o neutro aterrado; a ligação à terra dos tanques de equipamentos precisa ser comum ao aterramento dos para-raios e interligado ao neutro da rede; em redes com condutor neutro multi-aterrado, os aterramentos necessitam ser feitos de acordo com os consequentes critérios seguir.

Condutor neutro no transcorrer e no fim da rede: uma haste de aço, galvanizada, tipo cantoneira com dimensões 5 x 25 x 25 x 2400 mm; usando como condutor de aterramento cordoalha de aço galvanizado com 6,4 mm (1/4”); para-raios, transformadores e equipamentos especiais (religadores, capacitores e chaves): três hastes de aço com cobre de diâmetro de 16 mm, 2400 mm de comprimento e condutor de aterramento em aço com cobre de diâmetro de 5,20 mm (4 AWG); equipamentos especiais (religadores, capacitores, chaves e reguladores de tensão) em redes primárias sem neutro disponível: organizar o projeto de aterramento característico para cada caso.

Constatou-se que a Norma Brasileira Regulamentadora - NBR 15751/2009 exibe as recomendações práticas que necessitam ser levadas em consideração em meio ao projeto da malha de aterramento de uma subestação. Notou-se que estas são sugestões fundamentais, que em inúmeras circunstâncias precisarão ser objeto de estudo característico para uma especificação que venha a atender inteiramente os aspectos de segurança e operacionais a serem levados em consideração.

Além do mais, observou-se que cuidados especiais precisam ser tidos para o aterramento de estruturas metálicas extensas em todo o perímetro de uma subestação (como tubulações, cercas, linhas de comunicação etc.), visto que as próprias podem transmitir potencialidades de toque perigosos para fora da subestação.

Por fim, concluiu-se que o aterramento é usado para obter um ponto de

referência para medir a voltagem, para obter um caminho de retorno comum para a conexão física do corpo. Uma subestação trata-se de uma montagem de grande número de equipamentos elétricos. Todo o equipamento, assim como o pessoal que trabalha, deve ser seguro, mesmo em condições adversas.

Ademais, como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se estudos que busquem descrever uma subestação de energia elétrica de consumidor de média tensão, propondo melhores soluções para monitorá-la, com o intuito de também conhecer os equipamentos que formam a subestação de consumidor e formas de se situar uma comunicação entre as subestações e áreas longínquas para gestão.

REFERÊNCIAS

ASM LATIN. **Leilões de energia no Brasil.** 2019.

BOMBASSARO, P. R. **Projeto de Rede de Distribuição – Cálculo Elétrico – Norma Técnica.** Documento: 12566. Santa Cruz: CPFL, 2009.

CREDER, H**. Instalações Elétricos.** 15ª ed. Rio de Janeiro – LTC, 2007.

FRANÇA, R de C. **Projeto de modernização de subestação consumidora.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - Curso de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

FUGIMOTO, S. K. **Estrutura de tarifas de energia elétrica análise crítica e proposições metodológicas.** São Paulo. Tese de Doutorado em Engenharia. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

HODGE, B. K. **Alternative energy systems and applications**. John Wiley & Sons, 2017.

KAGAN, N; OLIVEIRA, C. C. B de; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** 1º Ed. São Paulo: Edgard Blücher. 2005.

KINDERMANN, G; CAMPAGNOLO, J. M. **Aterramento Elétrico.** 6ª ed. Florianópolis – EEL/UFSC, 2011.

MAMEDE, J. F. **Manual de Equipamentos Elétricos.** 3ª Edição. Rio de Janeiro: LTC. 2005.

MARTINS, J. S., COUTO, C; AFONSO, J. L. **Qualidade de energia elétrica.** 3º Congresso Luso-Moçanbicano de Engenharia – CLME'2003. Maputo – Moçambique, 2003.

MUZY, G. L. C de O**. Subestações Elétricas.** Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação - Curso de Engenharia Elétrica. Escola Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

OLIVEIRA, M. E. **Avaliação de Metodologias de Cálculo de Perdas Técnicas em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica.** Dissertação de Doutorado - UNESP/SP. São Paulo, 2009.

PAULINO, C. A. **Estudo de tecnologias aplicáveis à automação da medição de energia elétrica residencial visando à minimização de perdas.** Tese de Mestrado em Engenharia Elétrica - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.

PEREIRA S. V; VENTURA, F. A. **Comparativo da Energia Eólica com a energia elétrica no Brasil.** *In:* Fateclog – congresso de logística das faculdades de tecnoloiga do centro Paula Souza. São José dos Campos. Anais. Distribuição. São José dos Campos, 2014.

PREMALATHA, M. **Wind energy: Increasing deployment, rising environmental concerns.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 31, 2014.

ROCHA, P. L. **Introdução à Modelagem de Sistemas de Aterramento.** Projeto de Graduação, Escola Politécnica/UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

TOSSI, L; STAROSTA, J. **Infraestrutura, instalações e as cargas de missão crítica.** O Setor Elétrico, Belo Horizonte, v. 01, nº 01, 2013.

WILSON, C; GRUBLER, A. **Lessons from the history of technological change for clean energy scenarios and policies.** Natural Resources Forum, v. 35, nº 03, 2011.