



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS CAMPUS PALMAS
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

VINICIUS GOIS DOS SANTOS

**ANÁLISE E PLANEJAMENTO PARA UMA MELHOR
RECOMPOSIÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA**

Palmas – TO

2022

VINICIUS GOIS DOS SANTOS

**ANÁLISE E PLANEJAMENTO PARA UMA MELHOR
RECOMPOSIÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal do Tocantins Campus
Palmas como requisito básico para conclusão
do curso de Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Dr. Adjunto III Adélcio
Maximiano Sobrinho.

Palmas – TO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

- S237 a Santos, Vinicius Gois dos.
ANÁLISE E PLANEJAMENTO PARA UMA MELHOR
RECOMPOSIÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA. / Vinicius Gois dos Santos. – Palmas, TO, 2022.
55 f.

Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2022.
Orientador: Adelicio Maximiano Sobrinho

1. Subestação. 2. Recomposição. 3. Transformadores. 4. Energia. I. Título
CDD 621.3
-

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizada desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

VINICIUS GOIS DOS SANTOS

**ANÁLISE E PLANEJAMENTO PARA UMA MELHOR
RECOMPOSIÇÃO DE UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE
ENERGIA**

Trabalho de conclusão de curso apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica para ser avaliada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e analisada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de Aprovação 10 / 02 / 2022

Banca examinadora:

Adelicio Maximiano Sobrinho

Prof.º Dr. Adelicio Maximiano Sobrinho, UFT

Alexandre Andrade Mota

Prof.º Me. Alexandre Andrade Mota, UFT

gov.br

Documento assinado digitalmente
SERGIO MANUEL RIVERA SANHUEZA
Data: 10/02/2022 22:11:36-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof.º Dr. Sergio Manuel Rivera Sanhueza, UFT

Palmas - TO

2022

Dedico este trabalho a minha mãe por me ajudar a chegar até aqui, por ser uma válvula de escape nos momentos mais difíceis do curso. A minha irmã por ser minha parceira e nunca desacreditar de mim. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe, Luciene Gois e minha irmã Bruna Mikaelly, que mesmo com toda dificuldade sempre estiveram me apoiando e nunca mediram esforços para eu conseguir meus objetivos.

Agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo nessa caminhada tão difícil, em especial a Alana Pereira, Cristiano Lino, Igor Eduardo, Marcelo Cirqueira, Michael Lima, Natalia Teles e Victor Augusto.

Agradeço a todos os professores que me ensinaram a ser um profissional de engenharia elétrica, em especial ao meu orientador, Adelicio Maximiliano, por toda paciência, compreensão e incentivo para realizar esse trabalho.

RESUMO

O Brasil é um dos 10 maiores produtores de energia do mundo, possui uma extensa malha energética ligada através do Sistema Interligado Nacional (SIN). Apesar das extensas linhas de energia que cortam o país, a região norte do país possui poucas linhas de transmissão e, em casos de emergência, demanda de muito tempo e manutenção para reativação de uma subestação. Nesse sentido, é possível que estados da região enfrentem situações de calamidades ocasionados por problemas elétricos, como aconteceu no estado do Amapá em 2020, deixando o estado com energia elétrica por meio de rodízio durante 22 dias. Diante disso, o presente trabalho visa estudar o tempo de recomposição de uma subestação em caso de surtos que danifiquem sua estrutura e causem blecaute na região atendida. Para calcular este tempo, levou-se em consideração importantes cidades no Tocantins como Paraíso do Tocantins, além de cidades mais distantes da capital Palmas, exemplo de Bielândia. Além do tempo de deslocamento de equipe de manutenção e de uma subestação móvel, levou-se em consideração o tipo de pavimento da rodovia e condições gerais da pista. Por fim, é instigado ainda a possibilidade de cada subestação ter um transformador reserva, o que tornaria o tempo de recomposição menor, o tempo de reparo poderia se estender, para que a equipe de manutenção realizasse os reparos com calma e não prejudicar a região atendida. Porém, isso torna operação da concessionária mais cara, e muitas vezes inviável financeira e operacionalmente.

Palavras-chave: Subestação. Recomposição. Transformadores. Energia.

ABSTRACT

Brazil is one of the 10 largest energy producers in the world, it has an extensive energy grid connected through the National Interconnected System (SIN). Despite the extensive power lines that cross the country, the northern region of the country has few transmission lines and, in cases of emergency, it takes a long time and maintenance to reactivate a substation. In this sense, it is possible that states in the region face calamities caused by electrical problems, as happened in the state of Amapá in 2020, leaving the state with electricity through a rotation for 22 days. Therefore, the present work aims to study the recovery time of a substation in case of outbreaks that damage its structure and cause blackout in the region served. To calculate this time, important cities in Tocantins, such as Paraíso do Tocantins, were taken into account, as well as cities further away from the capital Palmas, such as Bielândia. In addition to the travel time of the maintenance team and a mobile substation, the type of road pavement and general conditions of the road were taken into account. Finally, the possibility of each substation having a spare transformer is also encouraged, which would make the recovery time shorter, the repair time could be extended, so that the maintenance team could carry out the repairs calmly and not harm the region served. However, this makes the operation of the concessionaire more expensive, and often financially and operationally unfeasible.

Keywords: Substation. Recomposition. Transformers. Energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Transformador de potência trifásico	19
Figura 2 - Transformador de potência monofásico.	20
Figura 3 - Esquema básico do sistema elétrico com os tipos de transformadores.....	20
Figura 4 - Transformador de corrente em uma subestação.	21
Figura 5 - Disposição do transformador de potencial em uma subestação.	22
Figura 6 - Funcionamento do Relé de Buchholz	24
Figura 7 - Disposição do relé de Buchhols no transformador de potência.....	24
Figura 8 - Esquema de funcionamento da válvula de alívio de pressão básica.....	25
Figura 9 - Estrutura física da válvula de pressão.....	25
Figura 10 - Disposição da parede corta fogo na subestação.....	26
Figura 11 - Ordem de grandeza dos valores de tensão e tempo das sobrecorrentes.....	27
Figura 12 - Para-raios de óxido de Zinco.	28
Figura 13 - Relé de Proteção	28
Figura 14 - Transformador de serviço auxiliar com isolamento á papel-óleo.	29
Figura 15 - Transformador de serviço auxiliar com isolamento a óleo.	29
Figura 16 - Disposição dos bancos de baterias.....	30
Figura 17 - Retificador/Carregador de baterias	31
Figura 18 - Separação por parede corta-fogo	35
Figura 19 - Transformadores em paralelo	36
Figura 20 - Fluxograma com as manobras de operação.	38
Figura 21 - Transformador queimado na SE Macapá.....	39
Figura 22 - Diagrama Elétrico Simplificado do Sistema Amapá	41
Figura 23 - Subestação móvel de 30 MVA da WEG.	45
Figura 24 - Gráfico com os tempos de atendimento das cidades do Tocantins.	49
Figura 25 - Gráfico com comparativo entre os tempos de atendimento.....	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tempos estimados de mobilização e montagem de SE Móvel / Transformador Móvel.	46
Tabela 2 - Velocidade Máxima da SE Móvel I e II / Transformador Móvel.	46
Tabela 3 - Municípios e suas distancias da capital Palmas-TO.....	47
Tabela 4 - Situações de paradas.....	48

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sequência de Normalização dos Equipamentos da Rede - Falha do dia 03/11/2020 as 20h48min.....	42
---	----

LISTA DE ABREVIACÕES

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IED	Dispositivo Eletrônico Inteligente
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
RTC	Relação de transformação da corrente
SE	Subestação
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TR1	Transformador 1
TR2	Transformador 2
TR3	Transformador 3
UG	Unidade Geradora
UHE	Usina Hidroelétrica

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Justificativa	16
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Geral	15
1.2.2 Específico	16
1.3 Metodologia	17
1.4 Estruturo do trabalho	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1 Transformador de Potencia	19
2.2 Transformador de Corrente	21
2.3 Tranformador de Potencial	22
2.4 Proteções Intrínsecas dos transformadores	23
2.4.1 Relé de Buchholz	23
2.4.2 Proteção Térmica	24
2.4.3 Válvula de Alívio de Pressão	25
2.5 Parede Corta Fogo	26
2.6 Para-raios	26
2.7 Relé de Proteção	28
2.8 Tranformador de Serviço Auxiliar	29
2.9 Banco de Baterias	30
2.10 Retificadores	30
3 REQUISITOS MÍNIMOS PARA UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO	32
3.1 Mais de uma fonte de alimentação	32
3.2 Proteção geral e individual dos transformadores	32
3.3 Proteções intrínsecas para os transformadores	34
3.4 Para raios na entrada e saída da subestação e dos transformadores	34
3.5 Disposição das paredes corta-fogo	34
3.6 Transformadores reservas ensaiados e disponíveis para serem inseridos no sistema	35
3.7 Transformadores reservas paralelos aos transformadores em operação	36
3.8 Manobras para manutenção em uma subestação	38
4 LEVANTAMENTO DOS TEMPOS DE RECOMPOSIÇÃO DO AMAPÁ E DO TOCANTINS	39

4.1 Análise do apagão ocorrido no estado do Amapá em 2020	39
4.2 Recomposição de uma subestação em caso de contingência no Tocantins	43
4.2.1 Subestação móvel	44
4.2.2 Tempos para atendimento de contingência	45
5 RESULTADOS	49
6 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos grandes produtores de energia elétrica do mundo, tendo seu Sistema Elétrico de Potência (SEP) em constante evolução, buscando uma maior eficiência e qualidade para o consumidor final. O SEP é dividido em três sistemas, tais como: geração, que tem como destaque a produção de energia em hidroelétricas; transmissão com linhas percorrendo grandes distâncias e distribuição em sua maioria em áreas urbanas (BARROS, 2013).

A eletricidade é gerada em sua maioria longe de centros urbanos, por esse motivo, e faz necessário a utilização de longas linhas de alta tensão para transmissão de energia (BARROS, 2013). Logo, entre as usinas geradoras e o consumidor final, é necessário a instalação de subestações que é uma instalação que possui um conjunto de condutores, aparelhos e equipamentos com o objetivo de modificar as características da energia elétrica, permitindo a sua distribuição aos pontos de consumo em níveis adequados de utilização (BHSE,2020).

O SEP tem dependência absoluta das subestações de energia. As subestações (SEs) têm o papel de adequar os níveis de energia de forma que esta seja transmitida com mínimo de perdas possíveis e sem afetar o consumo.

Essas SEs têm diferentes tipos de proteção que são construídas e instalados nas linhas de distribuição, afim de isolar uma área ou proteger um equipamento, podendo acontecer desligamento individual ou em cascata das cargas (FILHO, 2002).

Os sistemas elétricos são desenhados para garantir o fornecimento contínuo e confiável de energia, inclusive na ocorrência de falhas na rede elétrica ou durante a manutenção nas subestações (DHAKAL, 2000).

O sistema elétrico é monitorado nos centros de operação, que inspecionam e operam em tempo real, com *softwares* especializados para tais tarefas. A recomposição do sistema depois de uma manutenção ou um distúrbio de elevadas proporções é uma das principais atribuições nos centros, devido a necessidade de dispor os serviços normalizados o mais breve possível (FILHO, 2002).

Existem órgãos reguladores que determinam as exigências essenciais para que o SEP esteja funcionando dentro de uma eficiência aceitável (BARROS, 2013). No âmbito de distribuição, a ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) estabelece normas, critérios e requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos, detalhando todo o processo que deve ser seguido para um bom planejamento da operação eletro energética.

Diante disso, o trabalho a seguir visa mostrar as peculiaridades referentes a recomposição das subestações de energia, em situações de manutenção ou incidentes, seguindo normas e operações a respeito do tema.

1.1 Justificativa

Diante dos últimos acontecimentos no mundo da engenharia elétrica, percebeu-se que se faz necessário uma abordagem sobre o tema em questão. O último acontecimento relevante sobre o tema foi marcado pelo apagão do estado do Amapá no norte do Brasil, gerando crise no estado e grandes transtornos para população, pois grande parte da alimentação do estado vem de um único lugar. Exemplo disso, o adiamento de duas semanas nas eleições municipais de 2020.

Perante isso, percebe-se que o tema em questão é abordado por poucas disciplinas durante o curso de Engenharia Elétrica. Portanto, se faz necessário desenvolver um trabalho de conclusão de curso com base no tema, trazendo informações claras e aprofundadas sobre os requisitos mínimos para recomposição de uma subestação de distribuição de energia.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

O trabalho visa definir os requisitos mínimos necessários para o funcionamento de uma subestação de distribuição, apresentar alternativas de recomposição para uma subestação com transformador em contingência, calcular estimativas de tempo de atendimento com subestações móveis e detalhamento de manobras necessárias a partir da análise dos equipamentos elétricos.

1.2.2 Específico

Serão abordados diversos fatores para o tema em questão, seguindo passos a seguir:

- ✓ Definir e conceituar os principais equipamentos necessários para o funcionamento de uma subestação de distribuição.
- ✓ Apresentar os tipos de manobras utilizadas para manutenção e ações corretivas em uma subestação.
- ✓ Análise do tempo de atendimento das subestações em municípios do Tocantins em caso de contingência, sendo atendidos por uma subestação móvel.

- ✓ Comparar o tempo de recomposição do episódio do Amapá com as estimativas calculadas para as cidades do Tocantins.
- ✓ Por fim, fazer os devidos resultados e conclusões a respeito do tema.

1.3 Metodologia

A partir de estudo bibliográfico definir os principais equipamentos de uma subestação de distribuição energia, como o transformador de potência, transformador de corrente, proteções intrínsecas de transformadores, para-raios, diretrizes e fases do processo da recomposição.

Análise das manobras de recomposição da subestação a partir de materiais bibliográficos e manuais. Elaborar um plano para atendimento de uma subestação em contingência a partir de dados da distribuidora de energia do Tocantins.

Após o plano de atendimento, fazer uma análise, levantamento e estimativa dos tempos de atendimento das subestações a partir de uma subestação móvel de energia adquirida para a distribuidora de energia e comparar com o tempo de recomposição do blecaute que ocorreu no estado do Amapá, através de materiais bibliográficos e relatórios do operador nacional do sistema elétrico brasileiros.

Após obtenção dos dados, elaborar gráficos e planilhas e fazer suas devidas análises sendo explicados, abordando tópicos, o que representam, quais inferências pode se realizar através dos mesmos, com isso finalizando toda interpretação dos resultados.

1.4 Estrutura do trabalho

No Capítulo 1 são mostrados a delimitação do escopo do projeto, bem como sua justificativa, os objetivos, a metodologia, a estrutura do projeto de graduação e o cronograma das atividades.

O Capítulo 2 apresenta as definições do transformador de potência, transformador de corrente, transformador de potencial, bem como as proteções intrínsecas dos transformadores de potência, parede corta fogo, transformador auxiliar, retificadores, para-raios e banco de baterias.

Já o Capítulo 3 são expostos os requisitos necessários para uma subestação, com suas normas e disposição dos dispositivos na subestação. Apresentando sobre a utilização de mais de uma fonte de alimentação, as normas das proteções geral e individual no transformador, bem

como os ensaios no transformador reserva para integrar na rede e a respeito de paralelismo de transformadores.

O Capítulo 4 é apresentado a respeito do acidente ocorrido na subestação de distribuição de energia na cidade de Macapá-AP, bem como os tempos de recomposição e detalhes de cada evento para a normalização da rede do estado do Amapá. Também é apresentado um método da concessionária de energia do estado do Tocantins para recomposição da subestação através da subestação móvel, utilizando diversos municípios do Tocantins para realização dos cálculos.

O Capítulo 5 apresenta os resultados com os dados levantados no capítulo 4 comparando os tempos de recomposição dos casos citados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Existem diversos equipamentos em subestações de energia, tais como o transformador (transformador) de potência, transformadores de Corrente - TC, transformadores de Potencial - TPs, transformador de serviço auxiliar, para-raios, retificadores, banco de baterias, relé de proteção, parede corta fogo, proteções intrínsecas para os transformadores de potência, etc. Sem esses equipamentos fica inviável a operação das subestações. A seguir, para uma fundamentação teórica a respeito do tema em questão, com base em bibliografias e normas que regem os principais temas de interesse neste trabalho, serão conceituados esses equipamentos bem como suas funções para a subestação.

2.1 Transformador de Potência

Os transformadores de potência são equipamentos que tem como princípio básico a conversão de diferentes patamares de tensão entre a fonte, que está ligada ao lado primário do transformador, e a carga que está ligada ao lado secundário do transformador (BECHARA, 2010).

Os TPs podem ser monofásicos ou trifásicos. A utilização de cada tipo é determinada em função de circunstâncias e da necessidade do consumidor. É identificado as Figuras 1 e 2 as duas configurações de transformadores de potência.

Figura 1 - Transformador de potência trifásico



Fonte: WEG (2018).

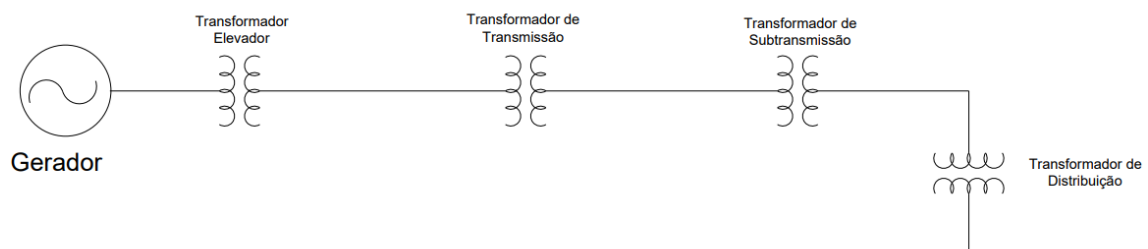
Figura 2 - Transformador de potência monofásico.



Fonte: RICARDO BECHARA (2010)

De acordo com (BECHARA, 2010), no SEP, existem vários tipos de transformadores com diferentes classes de tensão e potência. Tem-se o transformador elevador, abaixador ou distribuição, transmissão e subtransmissão. A Figura 3 apresenta o esquema básico do sistema elétrico com os tipos dos transformadores.

Figura 3 - Esquema básico do sistema elétrico com os tipos de transformadores.



Fonte: Próprio Autor

Observando o transformador, na sua parte externa há radiadores, tanque principal, buchas de baixa e alta tensão, trocadores de calor, tanque de expansão, etc.

2.2 Transformador de Corrente

O transformador de corrente (TC) é um aparelho que tem como função mostrar em seu lado secundário, uma corrente que é proporcional, a partir da Relação de Transformação da Corrente (RTC). Assim, o TC fornece um valor de corrente a um nível baixo para que possa ser utilizada em equipamentos de controle, medição e proteção (KINDERMANN, 2012).

O TC é feito com base no princípio da transformação e indução eletromagnética. Ele é um transformador de instrumento cujo o enrolamento primário é ligado em série com a linha da subestação, criando assim, um fluxo magnético que se concentra em seu circuito ferromagnético (núcleo do TC) e o seu enrolamento secundário tem a finalidade de alimentar bobinas ou entradas analógicas de corrente de instrumentos elétricos de medição, controle ou proteção, como por exemplo os relés de proteção (OLIVEIRA, 2020).

Logo, é montado para que possa ter o mínimo de erros durante as condições de curto-circuito (SANTOS, 2012). A Figura 4 mostra um transformador de corrente em uma subestação.

Figura 4 - Transformador de corrente em uma subestação.



Fonte: (DOCPLAYER, 2014)

2.3 Transformador de Potencial

Pode-se observar uma certa similaridade com o TC, pois o transformador de potencial (TP), tem a função de reduzir valores de tensão das redes de alta e média tensão a patamares que se possa ser usado para medição ou proteção. O TP pode ser usado para isolamento de circuitos da rede (TAKANO, 2011).

O TP tem seu enrolamento primário ligado em paralelo (derivado) com a linha da subestação e tem seu enrolamento secundário destinado a alimentação de dispositivos de proteção, medição e controle. Eles são construídos para atender os aparelhos de alta impedância como o relé de proteção, voltímetro (OLIVEIRA, 2020). Na Figura 5 nos apresenta a disposição do TP em uma subestação de energia.

De acordo com (MAMEDE FILHO, 2017), existem dois tipos de TPs, o capacitivo e o indutivo. Os do tipo indutivo tem um enrolamento primário com bastante espiras que envolve o núcleo de ferrosilício que é o mesmo utilizado ao lado secundário do transformador, eles são mais comuns tendo um custo de produção mais baixo, muita das vezes em tensões de nível igual ou menor a 138kV, pois a maioria das aplicações são atendidas por ele.

Os TPs indutivos são construídos por dois conjuntos de capacitores que tem como função prover um divisor de tensão e admitir a comunicação por um sistema denominado de *Carrier*. São construídos normalmente para níveis superiores a 138kV (MAMEDE FILHO, 2017). A Figura 5 mostra onde são instalados os TPs nas subestações.

Figura 5 - Disposição do transformador de potencial em uma subestação.



Fonte: OLIVEIRA (2018).

2.4 Proteções Intrínsecas dos Transformadores

Segundo (MALAFAIA, 2013) os transformadores são altamente exigidos quando estão funcionando em sua capacidade máxima, pois entre as bobinas e terminais tem uma grande transferência de energia. Logo, os transformadores são feitos com diversas estruturas de proteções que são colocados juntamente com o transformador, pois além de proteger o transformador, oferecem dados que auxiliam na manutenção e supervisão do mesmo.

Neste subtópico serão conceituadas as proteções intrínsecas dos transformadores que são altamente necessários para salvaguardar o transformador, mostrando o funcionamento e os objetivos do relé de *Buchholz*, relé de temperatura, supervisor de nível de óleo e válvula de alívio de pressão.

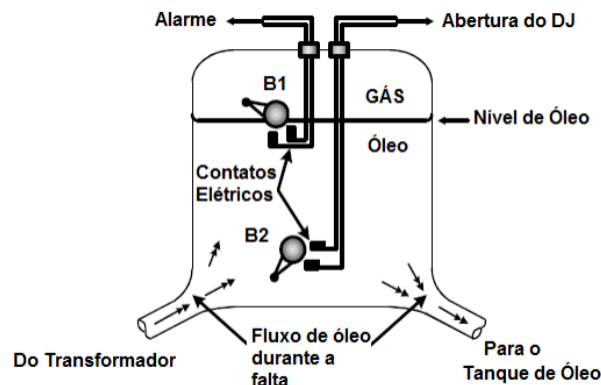
2.4.1 Relé de *Buchholz*

Um dos principais dispositivos de proteção dos transformadores de potência isolados à óleo que possuem tanque de expansão é o relé de *Buchholz*.

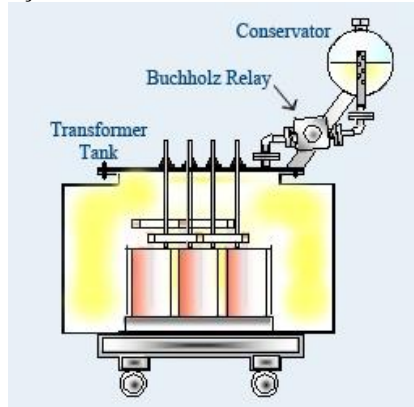
De acordo com (FERREIRA, 2012) diz que os transformadores podem apresentar defeitos intrínsecos que proporcionam correntes de curto-circuito de intensidades pequenas, podendo exibir defeitos entre as espiras que envolvem espiras vizinhas.

O Relé *Buchholz* é normalmente conectado em série com a tubulação que interliga o tanque principal com o tanque de expansão de óleo do transformador, dessa forma os gases originados internamente por eventuais falhas intermitentes ou persistentes, tendem a se deslocar para o tanque de expansão através da tubulação de interligação. Dessa forma, o gás é capturado e retido na câmara do Relé *Buchholz* e, ao atingir determinado volume, aciona o mecanismo do relé que faz atuar a boia referente ao contato do alarme (ELECTRA, 2008).

Sua construção detém de duas articulações que são dispostas na câmara de óleo, uma está colocada no topo e outro no fundo da câmara metálica. Cada braço é ligado com um interruptor de mercúrio. O conectado com o interruptor superior tem a função de ativar um circuito de alarme, já o inferior é conectado a um disjuntor externo. A Figura 6 mostra o funcionamento do relé de *Buchholz* e a Figura 7 mostra a disposição do relé de *Buchholz* no transformador de potência.

Figura 6 - Funcionamento do Relé de *Buchholz*

Fonte: (MALAFAIA, 2017)

Figura 7 - Disposição do relé de *Buchhols* no transformador de potência.

Fonte: (WEBSTARSNET, 2021)

2.4.2 Proteção térmica

Com as altas cargas nas quais os transformadores operam, é necessário monitorar sua temperatura para precaver possíveis falhas no isolamento dos enrolamentos causado pelo aumento indesejado da temperatura.

Segundo (HILTON, 2019) “existem dois tipos de proteção térmica para o transformador, a mecânica e a digital”. Para (MALAFAIA, 2017), com o avanço tecnológico, as proteções digitais se tornaram mais comuns nas subestações de energia, tornando a proteção mecânica obsoleta ou pouco usual.

As sondas térmicas contêm resistência para aguentar níveis agressivos de temperaturas, como as do óleo dos transformadores, dando a possibilidade de imergi-las no óleo isolante para averiguação das temperaturas com mínimo de erro possível (MALAFAIA, 2017).

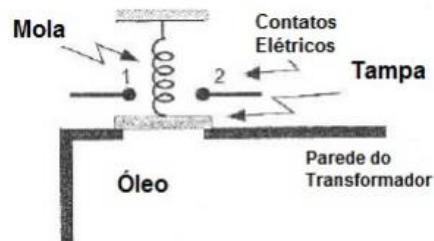
2.4.3 Válvula de Alívio de Pressão

Para (MALAFAIA, 2017) “podem ocorrer sobrepensões em transformadores que podem ocasionar riscos para o equipamento, pois o estufamento do tanque de óleo pode acarretar explosões que colocam em risco o transformador e os humanos que estejam ao redor”. Com isso, há os aparelhos que servem para aliviar a pressão, protegendo a caixa do transformador e os radiadores, pois com a ocorrência de curtos-circuitos internos e pressões geradas pelo transformador e pelo uso contínuo pode gerar esses problemas.

As válvulas de alívio de pressão são feitas de modo que quando as pressões ultrapassarem um limite estabelecido, o pino se rompa da sua posição inicial, gerando um pequeno orifício para a liberação da pressão interna e passagem do óleo.

Dentro desse dispositivo existem *microswitches* (contatos elétricos) que irão acionar o pino travando-o na posição final ativando um alarme para que o operador do transformador fique ciente do problema em questão. Depois da verificação do problema, tendo normalizado a situação, o responsável empurra a válvula para sua posição original para que esteja apto novamente. A Figura 8 apresenta o esquema de funcionamento da válvula de alívio de pressão básica e a Figura 9 mostra a estrutura física da válvula.

Figura 8 - Esquema de funcionamento da válvula de alívio de pressão básica.



Fonte: (MALAFAIA, 2017).

Figura 9 - Estrutura física da válvula de pressão.



Fonte: Qualitrol Defining Reliability (2021).

2.5 Parede corta fogo

A Parede Corta Fogo é uma proteção que tem como função desacelerar a propagação de fumaça, chamas e calor durante um incêndio, ou seja, evita que haja sobreaquecimento no caso de queima ou explosão de um dos equipamentos para que o outro disposto ao lado não venha aquecer ou ser incendiado. A Figura 10 apresenta a disposição da parede corta fogo na subestação.

Figura 10 - Disposição da parede corta fogo na subestação



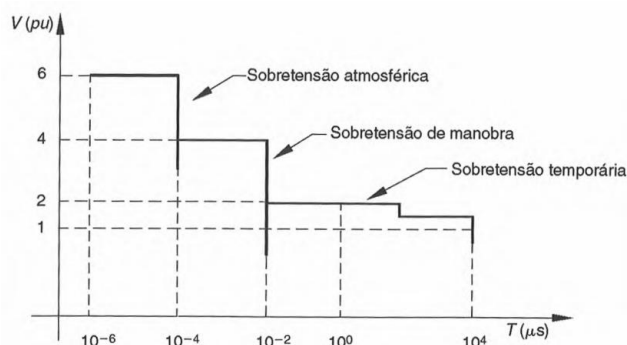
Fonte: Assessoria de Comunicação Social – Cooperativa Regional de Energia (2016)

2.6 Para-Raios

O trabalho de (MAMEDE FILHO, 2017) diz acerca dos para-raios, que têm como objetivo, impedir que os componentes dos sistemas elétricos sejam danificados por sobretensões causadas por descargas elétricas.

Como o próprio nome sugere, sobretensões são valores de tensão superior ao da tensão máxima do sistema. A sobretensão se dá devido a oscilação da tensão entre fase-fase ou fase-terra em relação ao tempo. Ela é rotulada em três tipos, tais como, temporária, devido as variações de carga no sistema de potência, atmosféricas, causadas por raios e de manobra, devido as manobras para ligar e desligar o sistema (MAMEDE FILHO, 2013). A Figura 11 apresenta a ordem de grandeza dos valores de tensão x tempo das sobre correntes.

Figura 11 - Ordem de grandeza dos valores de tensão e tempo das sobrecorrentes.



Fonte: MAMEDE FILHO (2013)

Os para-raios de proteção são classificados de acordo com parâmetros baseados na norma brasileira (NBR) 5424, tais como (MAMEDE FILHO, 2017):

- ✓ classe estação: 20, 15, 10 kA (serviço leve) e 10 kA (serviço pesado).
- ✓ classe distribuição: 5 kA séries A e B.
- ✓ classe secundária: 1,5 kV.

O para-raios tem como função a proteção contra as descargas atmosféricas e tem propriedades de não-linearidade dos elementos, eles são confeccionados para direcionar as correntes de descargas e posteriormente obstruir as correntes que advêm das correntes de descarga após a sua condução a terra. Os dois tipos de elementos de atributos não-lineares que tem a capacidade de proteção que compõem a construção dos para-raios são o óxido de zinco e o carbonato de silício (MAMEDE FILHO, 2017).

O para-raios de Carboneto de Silício (SiC) utilizam resistores não-lineares e um centelhador que é composto por diversos espaçadores (gaps). Os dois são dispostos em série formando um bloco de resistência, caso não tivesse o centelhador em série a corrente de fuga seria bastante elevada em condições nominais de tensão, capaz de causar perdas significativas e um excesso de aquecimento nas resistências não lineares de carboneto de SiC. Logo não é possível o para-raios de carboneto de Silício funcionar adequadamente sem o centelhadores em série (MARTINS & SILVA, 2006).

No para-raios de Óxido de Zinco (ZnO) já não é mais necessária a utilização dos centelhadores em série, devido sua característica tensão-corrente extremamente não linear, com seus resistores podendo ser ligados diretamente a rede, uma vez que na aparição da tensão normal de operação o aquecimento consequente é baixíssimo. Esse tipo de para-raios é constituído por blocos cerâmicos a base de óxido de zinco misturado com outros óxidos metálicos como o antimônio, o manganês, o bismuto e o cobalto (MARTINS & SILVA, 2006).

Seu tamanho físico é inferior ao de SiC e seu corpo pode ser tanto de porcelana onde estão instalados seus elementos ativos, quanto de polimérico que constitua-se de borracha de silicone. A Figura 12 exhibe o para-raios de Óxido de Zinco disposto em uma subestação de energia.

Figura 12 - Para-raios de óxido de Zinco.



Fonte: OLIVEIRA & JUNIOR (2018).

2.7 Relé de Proteção

De acordo com o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) o relé é um instrumento eletrônico projetado para responder a condições estabelecidas de entrada, depois de incidentes específicos, ocasiona operações de contato elétrico ou mudança súbita nos circuitos elétricos associados. As entradas dos relés podem ser mecânicas, térmicas e elétricas que são as mais usadas atualmente.

O relé de proteção tem a função de detectar defeitos em linhas de transmissão e dispositivos que estejam em condições de risco estabelecidas, dando instruções para abertura dos disjuntores para interromper o fluxo de carga no circuito (SILVA, 2012). A Figura 13 apresenta o relé de proteção.

Figura 13 - Relé de Proteção



Fonte: Schweitzer Engineering Laboratories (2021)

2.8 Transformador de Serviço Auxiliar

De acordo com a empresa ARTECHE os transformadores de serviço auxiliar têm como função fornecer energia elétrica de baixa tensão diretamente de uma linha de alta tensão. Esses transformadores combinam os benefícios de um transformador de potencial com as aplicações de um transformador de distribuição.

A sua principal aplicação é o fornecimento de eletricidade para serviços auxiliares das subestações, alimentando os equipamentos, dispositivos e todo o conjunto de equipamentos e painéis que necessários para a operação contínua dos sistemas. Esses transformadores são isolados por dois tipos de isolantes tais como, a isolação a papel-óleo e a isolação a gás (ARTECHE [s.d.]).

Eles têm uma conexão direta fase-terra com isolamento galvânico entre o enrolamento primário e secundário, que estão bobinados sobre o mesmo núcleo magnético, mas com isolamento independente. A Figura 14 dispõe o transformador com isolação a papel-óleo e a Figura 15 mostra o transformador com a isolação por gás.

Figura 14 - Transformador de serviço auxiliar com isolação á papel-óleo.



Fonte: ARTECHE [s.d.]

Figura 15 - Transformador de serviço auxiliar com isolação a óleo.



Fonte: ARTECHE [s.d.]

2.9 Banco de Baterias

As subestações necessitam de fontes de energia para manter a confiabilidade da operação dos dispositivos de proteção, comando de equipamentos, sinalização de alarmes e iluminação de emergência durante o período em que o retificador carregador estiver fora de serviço (SILVA, 2021).

O banco de baterias está disposto independente do sistema elétrico ao qual está ligado, portanto, na ausência de tensão fornecida pela fonte retificadora, o banco de baterias tem a finalidade de manter a alimentação das cargas CC de forma independente.

Existem diversos tipos de baterias tais como a de níquel-cádmio, as de chumbo-ácidas tanto seladas ou ventiladas e as de íon-lítio. A Figura 16 apresenta a disposição dos bancos de baterias.

Figura 16 - Disposição dos bancos de baterias.



Fonte: Site NEWMAX (2021).

2.10 Retificadores

Toda subestação de energia contém sistemas de monitoramento, proteção e religamento alimentados com corrente contínua. Para alimentar essas cargas críticas e garantir confiabilidade se faz necessário adicionar os sistemas a um banco de baterias. Para ter essas baterias carregadas e ser utilizadas para o mínimo funcionamento dos sistemas se faz necessário utilizar os retificadores ou carregadores de baterias (RTA, c2020).

Os retificadores são feitos para alimentar 100% das cargas da subestação e recarregar o banco de baterias no menor tempo possível estabelecido pela fabricante do banco. Esses

retificadores também podem executar o gerenciamento das baterias fazendo uma maximização de sua vida útil (RTA, c2020).

Para os retificadores é necessário ter uma grande proteção a descargas atmosféricas e variações de rede pois os mesmos em grande maioria são isolados em subestações, eles são próximos aos circuitos de média tensão da rede. Muitas vezes, isolados fisicamente no trajeto da linha de distribuição (RTA, c2020). A Figura 17 apresenta um retificar/carregador de bateria industrial.

Figura 17 - Retificador/Carregador de baterias



Fonte: POWERBRAS (c2020)

3 REQUISITOS MÍNIMOS PARA UMA SUBESTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO

Segundo a ONS, dispositivos e instalações não podem prejudicar a performance organizacional da rede elétrica, tampouco restringir a operação da rede básica ou das instalações de distribuição de energia elétrica, nem impor restrições às instalações a elas ligadas. Pois, se faz necessário uma coordenação e compatibilização para um bom funcionamento da subestação.

3.1 Mais de uma fonte de alimentação

Para uma boa operação da subestação, se faz necessário o uso de várias fontes de alimentação, pois caso o sistema tenha somente uma fonte em apenas um barramento, se houver uma falta na única linha ocasionada por acidentes e manutenção na linha de distribuição, todo o sistema ficará inoperante devido a essa configuração. Portanto, o uso de diversas fontes de alimentação ajuda o sistema a aumentar a sua operação, caso ocorra alguma falta em uma fonte, terá outra para suprir o ocorrido, sobretudo com uso de transformadores reservas alocados em paralelos ao transformador principal, utilizando-o quando necessário.

3.2 Proteção geral e individual para os transformadores

De acordo com o submódulo 2.6 – requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações da organização nacional do sistema elétrico (ONS), as subestações e transformadores devem seguir as seguintes normas:

Compreende o conjunto de relés e acessórios necessários e suficientes para a eliminação de todos os tipos de faltas internas – para terra, entre fases ou entre espiras – em transformadores de dois e três enrolamentos ou em autotransformadores. Devem prover também proteção de retaguarda para falhas externas e internas à sua zona de proteção e dos dispositivos de supervisão próprios de temperatura de enrolamento e de óleo, válvulas de alívio de pressão e relé de gás.

Para os transformadores ou autotransformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é igual ou superior a 345kV deve haver três conjuntos de proteção, tais como, proteção principal, alternada e intrínseca, como foi apresentado no Capítulo 2.

O tempo total de eliminação de faltas – incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores do transformador, pelas proteções unitárias ou restritas – não deve exceder a 120 ms.

As funções diferenciais (87) dos sistemas de proteção principal e alternada devem utilizar os enrolamentos dos transformadores de corrente localizados próximos aos disjuntores do transformador ou autotransformador, de forma a incluir em sua zona de proteção as ligações entre os disjuntores e o transformador ou autotransformador. As zonas de proteção das funções diferenciais devem se superpor com as zonas de proteção dos barramentos adjacentes.

As proteções unitárias ou restritas devem ter as seguintes funções:

- Função diferencial percentual (87) com atuação individual por fase;
- Número de circuitos de restrição igual ao número de transformadores de corrente da malha diferencial;
- Restrição da atuação para correntes de magnetização (inrush e sobreexcitação) e desempenhos transitórios desiguais de transformadores de corrente.

As proteções gradativas ou irrestritas devem ter as seguintes funções:

- Funções de sobrecorrente temporizada de fase (51) e de neutro (51 N) vinculadas a cada um dos enrolamentos do transformador ou autotransformador;
- Funções de sobrecorrente temporizada de terra (51 G) vinculadas a cada ponto de aterramento do transformador ou autotransformador;
- Função de sobretensão de sequência zero (59 G) vinculada ao enrolamento terciário ligado em delta, para alarme de faltas à terra.

Para os transformadores ou autotransformadores cujo mais alto nível de tensão nominal é inferior a 345 kV existem três tipos de proteção, que são, a proteção unitária ou restrita, proteção gradativa ou irrestrita e a proteção intrínseca conceituada no capítulo 2.

O tempo total de eliminação de faltas – incluindo o tempo de operação do relé de proteção, dos relés auxiliares e o tempo de abertura dos disjuntores do transformador ou autotransformador, pela proteção unitária ou restrita – não deve exceder a 150 ms. A função diferencial (87) da proteção unitária ou restrita deve utilizar enrolamentos dos transformadores de corrente localizados próximos aos disjuntores do transformador ou autotransformador, para incluir em sua zona de proteção as ligações entre os disjuntores e o transformador ou autotransformador de potência. A zona de proteção dessa função deve se superpor às zonas de proteção dos barramentos adjacentes.

As proteções unitárias ou restritas, gradativas ou irrestritas seguem as mesmas normas para os transformadores com nível de tensão igual ou maior que 345 kV.

3.3 Proteções intrínsecas para os transformadores

Seguindo as normas estabelecidas do submódulo 2.6 da ONS, as proteções intrínsecas para os transformadores independentemente do nível de tensão, devem ter as seguintes funções e características:

Função para detecção de faltas internas que ocasionem formação de gás (63) ou aumento da pressão interna (20);

Função de sobretemperatura do óleo (26) com dois níveis de atuação (advertência e urgência);

Função de sobretemperatura do enrolamento (49) com dois níveis de atuação (advertência e urgência) (ONS, 2011).

3.4 Para-raios na entrada e saída da subestação e dos transformadores

De acordo com a (ONS, 2011), os para-raios devem ser fixados nas entradas de linha, saídas de linhas, extremidade de barras de média tensão de subestações, nas conexões de unidades transformadoras de potência, de reatores em derivação e em capacitores que não são auto protegidos. Não devem atuar em sobretensões temporárias e devem ser capazes de descarregar surtos de alta energia sem se danificar ou alterar a característica de proteção, caso ocorra algum desses defeitos, é necessário a troca.

Os para-raios têm que ser do tipo estação a base de óxido metálico e sem centelhador, como por exemplo os para-raios de Óxido de Zinco.

3.5 Disposição das Paredes corta-fogo

Utilizando a NBR 13231 da associação brasileira de normas técnicas (ABNT) - Proteção contra incêndio em subestações elétricas convencionais atendidas e não atendidas, de sistemas de transmissão, e NBR 13859 – Proteção contra incêndio em subestações de distribuição, pode-se descrever as normas para disposição e tamanho das paredes nas subestações.

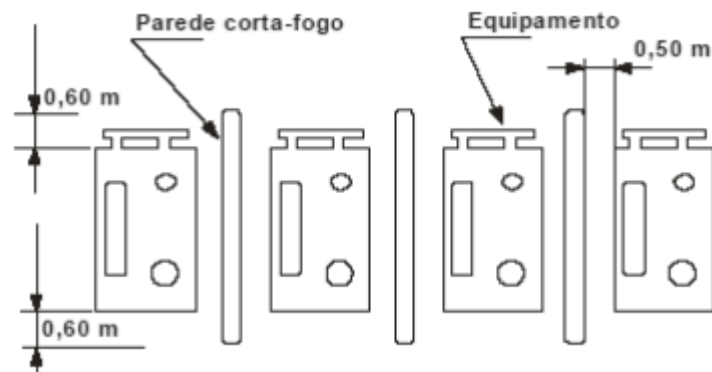
A parede tipo corta-fogo deve apresentar as seguintes dimensões para transformadores e reatores de potência (ver Figura 14):

- Para transformadores, a altura deve ser de 0,4m acima do topo do tanque conservador de óleo;

- Para reatores de potência, a altura deve ser de 0,6 m acima do topo do tanque;

- O comprimento total da parede deve, no mínimo, ultrapassar o comprimento total do equipamento protegido em 0,6 m;
- Distância livre mínima de separação física, entre a parede e o equipamento protegido, deve ser de 0,5 m.

Figura 18 - Separação por parede corta-fogo



Fonte: NBR 13231 (1994).

3.6 Transformadores reservas ensaiados e disponíveis para serem inseridos no sistema

Tendo em vista a necessidade de inserir um transformador reserva, deve-se realizar uma série de ensaios estabelecidos para certificar que o transformador está apto para inserção ao sistema, que serão apresentadas nos parágrafos a seguir.

Ensaio da relação de transformação: mais conhecido como RTC, é feito uma análise das bobinas e identificação da relação entre as espiras primárias e secundárias. Assim, seu funcionamento pode ser avaliado, podendo prevenir aparecimentos de curto-circuito entre as bobinas (GUIMARAES, 2020).

Ensaio de resistência de isolamento: esse ensaio tem como finalidade o diagnóstico das condições operacionais de equipamento, podendo constatar possíveis falhas nos materiais isolantes dos equipamentos elétricos através da inferência entre a tensão aplicada através de um megôhmetro e a corrente de drenagem nos dando valores das resistências. Portanto, esse ensaio permite que os componentes isolantes não sejam comprometidos (GUIMARAES, 2020).

Ensaio de resistência de contato: tem a função de identificar as mínimas condições operacionais de equipamentos de seccionamento de circuitos. Sendo o equipamento usado para a aplicação do teste chamado de microohmímetro. As resistências dos contatos são averiguadas com a aplicação de correntes de valores altíssimos no transformador, assim, o ensaio pode mostrar falhas que podem aparecer por causa de um mal contato entre seccionadores e disjuntores (GUIMARAES, 2020).

Ensaio de resistência Ôhmica do enrolamento: Esse ensaio busca mostrar a situação dos enrolamentos do transformador, verificar o estado, quanto a conservação e tempo de operação. Os valores de resistência são medidos com corrente a uma determinada temperatura contínua e comparados com valores dos ensaios de fábrica, caso haja discrepância provavelmente há problemas nos enrolamentos (JUNIOR, 2010).

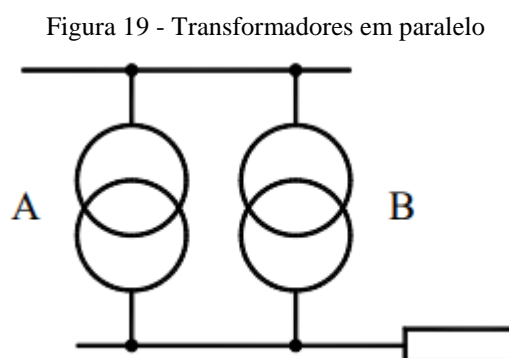
Teste de tensão aplicada: Tem como finalidade avaliar correntes de fuga que devem estar dentro dos limites considerados normais, estabelecidos pela fabricante. A fuga de corrente pode se dar pelo acúmulo de sujeira ou uma grande absorção de umidade (GUIMARAES, 2020).

Análise de qualidade de energia: O ensaio utiliza um equipamento chamado de analisador de qualidade de energia, que é um sensor que captura leituras elétricas do sistema e apresenta esses valores em forma de gráficos. Esse ensaio pode ajudar a identificar um problema no transformador (GUIMARAES, 2020).

Ensaio de Fator de Potência de isolamento: A finalidade desse ensaio é permitir a determinação das condições dos equipamentos, verificando as variações das características do isolante, se houver uma degradação da isolação reduzindo a sua rigidez dielétrica, faz-se necessário a manutenção do transformador (GUIMARAES, 2020).

3.7 Transformadores reservas paralelos aos transformadores em operação

É bastante comum a utilização de transformadores em paralelo pelas as companhias de energia para distribuição e no âmbito industrial. O trabalho de (LEMOZY, 2010) diz que para haver paralelismo de transformador, os mesmos precisam estar sujeitos a uma mesma rede de alimentação de energia elétrica e assim em conjunto fornecem uma energia igualitária a carga. A Figura 19 apresenta uma configuração simples de paralelismo de transformadores identificados como “A” e “B”.



Fonte: LEMOZY (2010)

O trabalho do (SANTOS, [s/D]) fala algumas condições que são exigidas para haver paralelismo de transformadores com um nível de segurança e de operacionalidade adequados, tais como:

- ✓ A alimentação primária dos transformadores tenha as mesmas características elétricas.
- ✓ A sequência de fase, RTC e fatores de curto circuito devem ser iguais em ambos transformadores.
- ✓ Os transformadores tenham o mesmo defasamento angular, ou seja, uma disposição igual tanto do lado primário quanto do lado secundário do transformador para não haver diferença de potencial entre as fases quando forem ligados os transformadores em paralelo, pois pode ocasionar curto circuito.
- ✓ As impedâncias percentuais sejam preferencialmente iguais havendo uma discrepância estabelecida por normas vigentes.

De acordo com (SILVA, 2018) partindo do princípio da eficiência, torna-se inviável sujeitar um paralelismo sem as condições apresentadas anteriormente, pois se os transformadores são submetidos sem que as tensões secundárias tenham o mesmo valor nominal e impedância de curto circuito concordante em ambos transformadores, pode haver uma distribuição de potência não igualitária, ocorrendo equilíbrio no sistema através de uma corrente reativa que circula no lado secundário, fazendo com ocorra um aquecimento desvantajoso oriundo das perdas intrínsecas ao transformador gerando uma limitação na capacidade de fornecimento as cargas.

As vantagens de se ter paralelismo em transformadores são:

- ✓ Melhora a eficiência do sistema.
- ✓ Aumenta a capacidade de carregamento da subestação.
- ✓ Normalmente é mais econômico instalar um transformador em paralelo do que apenas substituir o transformador existente por uma unidade de maior potência.
- ✓ Uma maior confiabilidade no sistema.
- ✓ Facilidade ou mesmo viabilização de transporte.

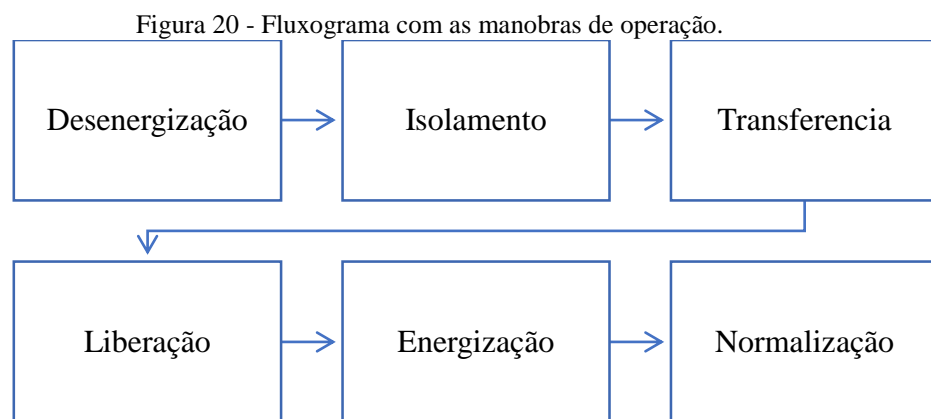
Depois de seguir os requisitos citados no subtópico 3.7, o transformador reserva pode ser alocado na rede, obedecendo todas as condições para o paralelismo caso esteja no mesmo barramento secundário, tornando o sistema mais confiável. No próximo subtópico serão abordadas as manobras para manutenção nos dispositivos da rede.

3.8 Manobras para manutenção em uma subestação

Para contextualização no trabalho, manobras são constituídas por uma sequência de instruções para ser executadas no sistema elétrico com objetivo de alterar o estado do mesmo. É umas das etapas mais críticas das atividades de uma subestação (FREITAS, 2015).

A composição de uma manobra se dá basicamente por operações de aterramento, seccionamento e de controle. As operações de aterramento e seccionamento consistem no abrimento ou fechamento de mecanismos de aterramento e seccionamento respectivamente, tais como disjuntores, chaves de isolamento e chaves de aterramento (FREITAS, 2015). Já as operações de controle consistem em assegurar o funcionamento efetivo do sistema, trazendo-o para dentro dos limites pré-estabelecidos e atendendo as normas pertinentes de proteção de uma subestação, sendo sua operação regular os níveis de tensão dos equipamentos e a transferência da função de proteção dos disjuntores.

Toda manobra tem uma tarefa bem definida, como por exemplo, retirar um transformador de operação, caso apresentar defeito, corrigir um disjuntor com falhas e também a normalização do sistema depois das falhas apresentados e corrigidas (FREITAS, 2015). A seguir uma sequência de manobras de operação para atendimento de uma contingência.



Fonte: Própria Autoria

Essas manobras são usadas em respostas a acontecimentos de decorrem no sistema elétrico, tais como falhas, sobrecarga, subtensão, sobretensão e manutenção.

Caso ocorra operações de manobras erradas, mesmo sendo pequenas, pode ocorrer excitações no sistema da subestação, em função disso, é necessária uma equipe técnica com um planejamento bem detalhado para que possam ser executadas, tendo uma análise prévia do sistema para prever possíveis consequências dessas manobras, de forma que as manobras não resultem em indesejadas situações (FREITAS, 2015).

4 LEVANTAMENTO DOS TEMPOS DE RECOMPOSIÇÃO DO AMAPÁ E DO TOCANTINS.

Neste capítulo são abordados os tempos de recomposição das subestações do Amapá e, diante do problema enfrentado pelo o estado, é calculado os tempos de recomposição para cidades específicas do Tocantins caso o mesmo problema ocorresse.

4.1 Análise do Apagão ocorrido no estado do Amapá em 2020

No dia 03 de novembro de 2020 ocorreu o maior blecaute no estado do Amapá, afetando mais de 90% (765 mil pessoas) da população do estado, deixando os mesmo com rodízio de energia por 22 dias.

Treze das dezesseis cidades do estado ficaram sem o abastecimento de energia devido a um curto circuito da fase B do transformador de 150MVA – transformador 1(TR1) 230/69/13,8 kV na principal subestação do estado que fica na capital Macapá. Só foi possível iniciar o processo de recomposição no dia seguinte do início do blecaute com apenas 15MW para poder atender as demandas básicas do estado, pois naquela época o Brasil estava passando pela maior pandemia das últimas décadas a COVID-19.

A SE de Macapá é a principal subestação do estado, sendo exclusivamente ligada ao SIN. Sua composição se dá por três transformadores trifásicos com capacidade de 150MVA.

A ocorrência da perturbação se deu na parte abaixadora da subestação com nível de tensão em 230/69/13.8 kV. Por volta de 20h48min começou-se o desligamento do transformador TR1 de 230/69/13,8 kV assim ocorrendo o desligamento da a usina hidroelétrica (UHE) Coaracy Nunes e do sistema Amapá que é atendido pela subestação (ONS, 2020). A Figura 21 apresenta o transformador que ocorreu o incêndio.

Figura 21 - Transformador queimado na SE Macapá.



Fonte: GLOBO COMUNICAÇÕES S/A (2020)

A perturbação que impactou as diversas cidades do estado do Amapá, iniciou-se com o referido desligamento automático do transformador TR1 230/69/13,8 kV da SE Macapá, devido a um curto-circuito interno na fase B do lado primário do transformador em questão, ocasionando um incêndio no transformador acarretando a perda total do equipamento. O curto circuito no TR1 foi eliminado em 78ms devido a atuação da função diferencial (87T), que tem sua associação a proteção individual do transformador e das proteções intrínsecas do mesmo, assim mandando comandos para abertura dos disjuntores no lado primário e secundário do transformador (CORDEIRO, 2021).

Com isso o transformador 3 (TR3) teve o desligamento automático acionado, cerca de 2s após o desligamento do TR1, devido à sobrecarga no mesmo, tendo em vista que o suprimento de 242 MW de potencial ficou sendo atendido somente pelo TR3, que tem uma potência de 150MVA (ONS, 2020).

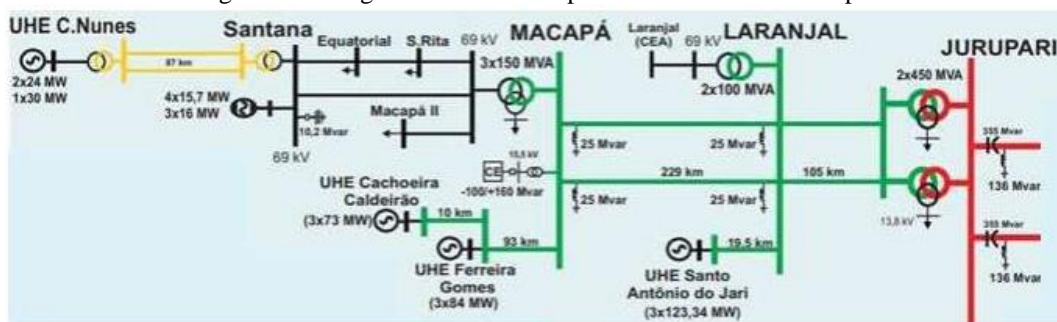
Tendo em vista o desligamento do TR3, teve consequência o ilhamento de toda a carga do estado alimentada pelo transformador da SE Macapá e a UHE Coaracy Nunes. Lembrando que a SE onde ocorreu a perturbação continha somente três transformadores, estando transformador TR2 230/69/13,8 kV indisponível, devido a explosão da bucha da fase de 69 kV desde do dia 30/12/2019, ocasionando vazamento de óleo. Logo a perturbação ocasionou a suspensão de quase 95% da carga total do estado (ONS, 2020).

Alguns segundos após o estrago na SE Macapá, ocorreu o desligamento automático da UHE Coaracy Nunes. Também houve o desligamento da UG01 da UHE Ferreira Gomes, que no horário do desligamento estava gerando 27MW (ONS, 2020).

Antes da perturbação o sistema de energia do Amapá operava com uma carga de 256MW, com 242MW sendo atendidas somente pela SE Macapá e UHE Coaracy Nunes, somente alguns municípios não estavam sendo atendidos pelo SIN (ONS, 2020).

A Figura 17 apresenta a disposição do diagrama do sistema Amapá, onde a alimentação das cargas de 13 municípios do estado é feita pela SE Macapá e UHE Coaracy Nunes, com a interligação ao SIN sendo feita através de uma linha de transmissão em circuito duplo de 230 kV. A UHE C. Nunes é composta por três unidades geradoras podendo gerar um total de até 78MW, mas no dia da perturbação a unidade geradora (UG1) encontra-se impossibilitado para operar, também a UG2 da UHE C. Nunes sofreu desligamento pela atuação de proteção de subfrequência que estava ajustada em 56Hz com temporização de 2s, logo após esse evento ocorreu o desligamento da UG3 pela proteção de sobrecorrente com controle por tensão (ONS, 2020).

Figura 22 - Diagrama Elétrico Simplificado do Sistema Amapá



Fonte: CORDEIRO (2021)

Logo após esses eventos de desligamento das duas unidades que alimentavam a maioria das cargas do sistema Amapá, se inicia as tentativas de recomposição do sistema, afim de retornar à estabilidade do mesmo.

Na SE Macapá às 22h54min houve uma tentativa para restabelecer a normalização do TR3, sendo energizado a vazio, porém ocasionou um curto circuito interno na fase B, provocando desligamento às 22h55min e tornando-o indisponível novamente. Diante disso, a alimentação das cargas ocorreu apenas pela UHE Coaracy Nunes, que começou a fase de recomposição fluente somente com uma unidade geradora, com intuito de realizar o controle de frequência da área, mas somente após a energização do primeiro circuito da linha de transmissão 138 kV Coaracy Nunes/ SE Santana e a tomada de carga inicial que conseguiu a permissão de sincronizar as outras UGs, mas infelizmente houve uma dificuldade para sincronizar as UGs no processo de tomada de cargas, observando diversos desligamentos causados pela variação na frequência (ONS, 2020). A Tabela 1 apresenta a sequência das ações de recomposição.

Quadro 1 - Sequência de Normalização dos Equipamentos da Rede - Falha do dia 03/11/2020 as 20h48min.

Sequência de normalização		
Hora	Instalação	Descrição do evento ou observações
21h32	SE Laranjal / SE Macapá	Ligada a LT 230 kV Laranjal / Macapá C1 AP
21h38	SE Macapá / UHE F. Gomes	Ligada a LT 230 kV F. Gomes / Macapá C1 AP
22h54	SE Macapá	Ligado o TR3 230/69 kV da SE Macapá AP
22h55	SE Macapá	Desligamento automático do TR3 230/69 kV da SE Macapá
23h16	SE Macapá / UHE F. Gomes	Desligada a LT 230 kV F. Gomes / Macapá C1 AP para controle de tensão
23h34	SE Macapá	Ligado o CE-1 160 / -100 Mvar Macapá AP
23h41	SE Macapá / UHE F. Gomes	Ligada a LT 230 kV F. Gomes / Macapá C1 AP
23h44	UHE F. Gomes / UHE C. Caldeirão	Ligada a LT 230 kV C. Caldeirão / F. Gomes C1 AP
23h48	UHE C. Caldeirão	Sincronizada a UG03 da UHE C. Caldeirão
23h59	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 04/11/20 00h23)
04/11/20 00h04	SE Santana	Energizada a barra 138 kV da SE Santana
04/11/20 00h38	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 01h09)
04/11/20 00h45	UHE F. Gomes	Sincronizada a UG01 da UHE F. Gomes
04/11/20 00h49	SE Laranjal / SE Macapá	Ligada a LT 230 kV Laranjal / Macapá C2 AP
04/11/20 01h35	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 03h09)
04/11/20 01h52	UHE Coaracy Nunes	Sincronizada a UG03 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 02h10)
04/11/20 03h22	UHE F. Gomes	Desligamento automático da UG01 da UHE Ferreira Gomes
04/11/20 04h33	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG03 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 04h54).
04/11/20 05h03	UHE F. Gomes	Sincronizada a UG03 da UHE Ferreira Gomes.
04/11/20 05h06	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 06h03)
04/11/20 06h09	UHE Coaracy Nunes	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 11h50)
04/11/20 06h09	UHE Coaracy Nunes	Sincronizada a UG03 da UHE Coaracy Nunes (novo desligamento automático 11h50). Às 06h43 foi iniciada a recomposição das cargas da CEA pela UHE Coaracy Nunes atingindo um montante de 38 MW às 11h43.
04/11/20 11h50	UHE Coaracy Nunes	Desligamento automático das UG02 e UG03 da UHE Coaracy N. interrompendo 38 MW de cargas restabelecidas até o horário.
04/11/20 13h00	UHE Coaracy N.	Ligada a UG02 da UHE Coaracy Nunes
04/11/20 13h25	UHE Coarac Nunes	Sincronizada a UG03 da UHE Coaracy Nunes Às 13h26 iniciada nova recomposição das cargas da CEA pela UHE Coaracy Nunes, atingindo patamares de 35 MW, seguidos de novos desligamentos da UHE Coaracy Nunes interrompendo as cargas restabelecidas.
07/11/20 04h03	SE Macapá	Ligado o TR3 230/69 kV da SE Macapá AP, fechando o paralelo do sistema Macapá com o SIN, atingindo o valor de 120 MW Às 14h30, restabelecendo cerca de 60 a 70% da carga de Macapá.

Fonte: ONS (2020).

A partir do dia 08/11/2020 a energia começa a ser restabelecida de forma de rodízio. Sendo racionada a uma alternância no serviço de fornecimento de energia a cada 6 horas por região que ocorreu até 12/11/2020 onde o racionamento passou a ser a cada três horas (ONS, 2020).

No dia 16/11/2020 geradores termoelétricos a combustão chegaram no Amapá para conseguir aumentar a capacidade de fornecimento de energia até a chegada e a instalação de um segundo transformador na SE de Macapá.

Após 22 dias do blecaute, no dia 24/11/2020 a distribuidora de energia do estado anuncia a suspensão do rodízio e informa que o abastecimento de energia voltou a 100%.

4.2 Recomposição de uma subestação em caso de contingência no Tocantins

A ONS define que a recomposição de uma subestação tem como foco a minimização do tempo de interrupção do sistema elétrico, de forma que essa atividade ocorra o mais rápido possível. O processo tem diferentes meios para ser executado, com a responsabilidade podendo ser do centro de operações da distribuidora ou dos operadores que estão nas subestações.

A recomposição é feita por meio do controle de elementos que operam em estado de aberto ou fechado, como chaves seccionados e disjuntores. Com a sua manipulação é possível a alteração dos estados das cargas nos diferentes caminhos da rede de distribuição. Para tal tarefa, se faz necessário um planejamento com a finalidade de estruturar um modelo de recomposição por meio de diversas etapas (MOTA,2005).

O transformador reserva é um dos equipamentos mais importantes para a recomposição de uma subestação levando em consideração que esse material é utilizado para substituir o transformador de operação. Eles são alocados das seguintes maneiras (MAIA,2018):

- ✓ Reserva quente: são transformadores já instalados na subestação, energizados, mas não assumem as cargas em operação permanente. Só são utilizados quando houver a necessidade de substituir os transformadores de operação.
- ✓ Reserva fria: são transformadores que estão dentro da subestação, desenergizados, porém fora do sistema.
- ✓ Reserva Disponível: são transformadores que estão provisoriamente na reserva, e disponíveis para instalação no arranjo.
- ✓ Reserva Estratégica: São transformadores que estão em pontos estratégicos para a manutenção, seja para atividades programadas ou não, no qual não é possível dispor para instalação definitiva.

Nesse trabalho terá como foco nas subestações móveis adquirida pela concessionária de energia elétrica do Tocantins, sua definição, bem como sua importância será apresentado no subtópico seguinte.

4.2.1 Subestação móvel

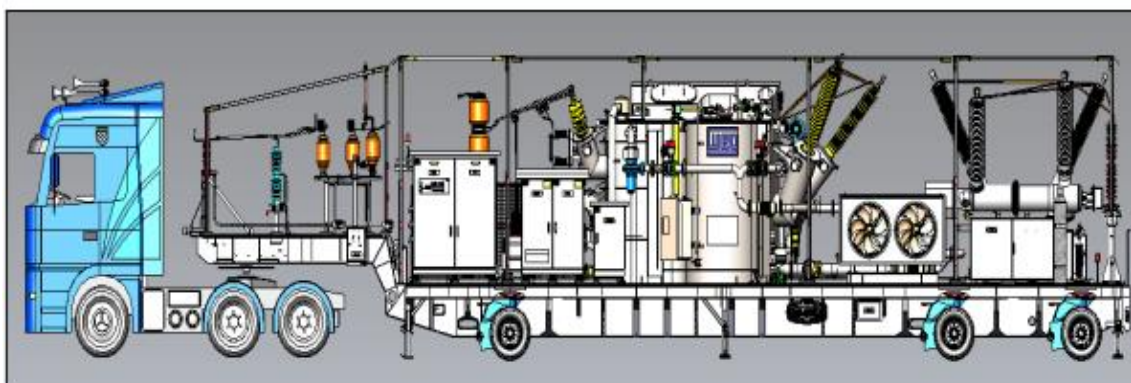
As subestações móveis têm um potencial enorme para fornecimento de energia elétrica, podendo atender grandes demandas. Essas SEs são utilizadas para uma restauração ou recomposição mais acelerada em casos de emergência, antecipação de energização em obras prioritárias e atendimento de cargas sazonais. Com isso ela permite uma maior mobilidade e flexibilidade para diminuir a interrupção do fornecimento de energia (TECNOGERA, 2017).

De acordo com (FILHO, 2020) as SEs móveis geralmente contêm aparelhos compactos e é composta por um transformador de potência com sua capacidade definida pela concessionária que irá utilizar nas ocasiões de emergência, para-raios, chaves seccionadoras e disjuntores, tanto no lado primário quando no lado secundário do transformador, painel de medição de faturamento, relés de proteção e transformador de serviço auxiliar, juntamente com sua chave seccionadora e o painel de serviços auxiliares, que é composto pelo sistema de retificação e banco de baterias.

As SEs móveis podem ser classificadas do tipo abertas ou fechadas. As SEs móveis fechadas são enclausuradas, que usualmente é transportada até o ponto da subestação e colocada em uma base fixa temporária (FILHO, 2020).

A SE móvel utilizada nesse trabalho para fins de cálculos será a SE de 30MVA, que tem um peso de 74 toneladas, altura máxima de 4,4 metros e 3 metros de largura, sendo o comprimento total da subestação com o cavalo mecânico de 23 metros e sem o cavalo é de 18 metros (WEG,2015). A Figura 23 representa uma subestação móvel com seus equipamentos dispostos na carroceria e o cavalo mecânico que a transporta.

Figura 23 - Subestação móvel de 30 MVA da WEG.



Fonte: WEG (2015)

4.2.2 Tempos para atendimento de contingência

Para um melhor planejamento de tempo de atendimento e recomposição de uma SE, será adotada uma equação matemática para modelar o processo. Essa formulação leva em respeito o tempo de mobilização, a montagem dos equipamentos e o tempo para chegada da SE móvel e foi feita pela a distribuidora do estado do Tocantins (MAIA, 2018).

$$T = M_o + M + C \quad (1)$$

Onde:

T é tempo de atendimento para a subestação móvel entrar em operação, levando em consideração todas as etapas para normalizar o serviço da subestação que irá receber a SE móvel.

M_o é a tempo para montagem, que leva em consideração o tempo para adequação do barramento para a energização, tempo de preparação, conexões da SE móvel, manobras e ensaios elétricos para colocar o transformador em operação. Os ensaios são feitos através de instrumentos levados juntamente com a missão, tais como: analisador portátil de gases, medidor de fator de potência e corrente de excitação, medidor de resistência ôhmica, medidor de isolamento e de relação de transformação. Todos esses ensaios já foram descritos no capítulo 4.

M é o período para acionamento da equipe técnica da distribuidora e preparativos necessários para o atendimento do problema.

C é o tempo que o transformador móvel demora para chegar no local específico, considerando as condições do percurso. O argumento “C” da Equação 1 é calculado pela razão entre a

distância em km a ser percorrida desde o local do transformador backup até a subestação do transformador avariado e a velocidade média estimada de deslocamento da SE Móvel.

A seguir serão apresentados os principais tipos de transformadores que compõem as subestações móveis no estado do Tocantins.

- ✓ SE Móvel I 30MVA 138/69 kV e 34,5/13,8kV
- ✓ SE Móvel II 25MVA 138/69 kV e 34,5/13,8kV

A Tabela 1 apresenta os tempos para mobilização e montagem para cada SE móvel em cidades específicas do Tocantins.

Tabela 1 - Tempos estimados de mobilização e montagem de SE Móvel / Transformador Móvel.

Tempos estimados de mobilização e montagem		
SEs Móveis	Tempo Mínimo (h)	
SE Móvel I 30MVA 138/69 kV	Mobilização	1
SE Móvel I 30MVA 138/34,5 kV	MONTAGEM	11
SE Móvel I 30MVA 34,5/13,8 kV	Total	12
SE Móvel II 25MVA 138/69 kV		
SE Móvel II 25MVA 34,5/13,8 kV		

Fonte: MAIA (2018)

A Tabela 2 apresenta a velocidade máxima permitida das SEs móveis de 30 MVA e 25 MVA para estradas pavimentadas e não pavimentadas. Essa velocidade média é definida levando em consideração a composição e peso dessas SEs, sendo definida pelo DETRAN por meio da autorização especial de trânsito (AET) baseada na resolução 11 do DNIT de 25/10/2004, informando a origem e destino da viagem, as rodovias e o km inicial e final.

Tabela 2 - Velocidade Máxima da SE Móvel I e II / Transformador Móvel.

Velocidade Máxima da SE Móvel		
SEs Móveis	Velocidade Máxima(km/h)	
SE Móvel I 30MVA 138/69 kV	60	Estrada Pavimentada
SE Móvel I 30MVA 138/34,5 kV	40	Estrada Não Pavimentada
SE Móvel I 30MVA 34,5/13,8 kV		
SE Móvel II 25MVA 138/69 Kv		
SE Móvel II 25MVA 34,5/13,8 kV		

Fonte: MAIA (2018)

A seguir serão apresentados os cálculos de estimativa dos tempos para recomposição de subestações em diferentes cidades do Tocantins, tendo como referência de distância a cidade de Palmas-TO. Como mencionado anteriormente neste capítulo, será utilizada a SE móvel de 30 MVA para fins de demonstração de cálculo, para todas as cidades de acordo com a Tabela 1 será adotado o tempo de mobilização de 1h e de montagem de 11hs e velocidade máxima da

subestação móvel de 60 Km/h. A Tabela 3 exibe os municípios adotados para os cálculos estimativos bem como suas respectivas distâncias do ponto de referência.

Tabela 3 - Municípios e suas distancias da capital Palmas-TO.

Tabela com os municípios e as suas respectivas distancia de Palmas.	
Cidades	Distância (Km) de Palmas-TO
Augustinópolis	634
Marilândia do Tocantins	434
Colmeia	224
Bielândia	435
Arraias	414
Pedro Afonso	179
Paraíso do Tocantins	75

Fonte: Própria Autoria

A SE de Augustinópolis contém dois transformadores de força, um operando em 69/34,5kV e outro operando em 34,5/13,8kV. O transformador 1 possui uma potência nominal de 10MVA, podendo chegar a 12,5MVA com ventilação forçada. O transformador 2 tem uma potência nominal de 1,5MVA. A SE de Augustinópolis é alimentada pela linha que fica entre

A SE abaixadora de Marilândia do Tocantins contém apenas um transformador de força operando em 34,5/13,8kV. O transformador 1 possui uma potência nominal de 0,4MVA. A alimentação da SE vem da cidade de Araguaçu.

A SE de Colmeia contém apenas um transformador de força operando em 34,5/13,8kV. O transformador possui uma potência nominal de 3MVA. A SE é alimentada tanto pela SE Guaraí II e pela SE Presidente Kennedy.

A SE de Bielândia possui apenas um transformador de força operando em 138/34,5kV. O transformador possui uma potência nominal de 15MVA e podendo operar em 18,75MVA com ventilação forçada. Ela é alimentada pela SE Araguaína 3. Bielândia alimenta cinco cidades com sua SE.

A SE de Arraias contém apenas um transformador de força operando em 138/34,5kV. O transformador possui uma potência nominal de 15MVA e podendo operar em 20MVA com ventilação forçada. Ela é alimentada pela SE pelo município de Peixes.

A SE de Pedro Afonso contém dois transformadores de força, um operando em 69/34,5kV e outro operando em 34,5/13,8kV. O transformador 1 possui uma potência nominal de 10MVA, podendo chegar a 12,5MVA com ventilação forçada. O transformador 2 tem uma potência nominal de 5MVA. A SE é alimentada pela linha que vem do município de Guaraí.

Paraíso do Tocantins contém duas subestações a SE PARAISO I e a SE PARAISO II. A SE I é constituída com dois transformadores separados em barramentos de tensões diferentes, o transformador 1 opera em 138/34,5kV e o transformador 2 opera em 138/13,8kV, sendo suas potencias nominais iguais de 20MVA podendo chegar a 25MVA com ventilação forçada. A SE II possui três transformadores, sendo dois principais com apenas um em operação e um transformador reserva regulador de 30MVA operando em 138/69 kV. O transformador principal opera no nível de tensão de 138/34,5kV alimentando o Distrito industrial de Paraíso e o distrito de Luzimangues.

Ao utilizar a Equação 1 para os cálculos estimativos, chega-se aos seguintes resultados:

- ✓ Augustinópolis: $T = 1 + 11 + (634/60) = \mathbf{22h33min}$;
- ✓ Marilândia: $T = 1 + 11 + (634/60) = \mathbf{22h33min}$;
- ✓ Colmeia: $T = 1 + 11 + (224/60) = \mathbf{15h43min}$;
- ✓ Bielândia: $T = 1 + 11 + (435/60) = \mathbf{19h15min}$;
- ✓ Arraias: $T = 1 + 11 + (414/60) = \mathbf{18h54min}$;
- ✓ Pedro Afonso: $T = 1 + 11 + (179/60) = \mathbf{14h59min}$.
- ✓ Paraíso do Tocantins: $T = 1 + 11 + (75/60) = \mathbf{12h15min}$;

Além do tempo calculado pela equação, para que se tenha uma estimativa com maior precisão é importante considerar as pausas que serão feitas durante o percurso como, abastecimento do veículo, paradas para alimentação, pausa para descanso, etc. A Tabela 4 mostra algumas situações que podem ocorrer durante a viagem com a estimativa de tempo gasto para cada uma delas.

Tabela 4 - Situações de paradas

Situações de Paradas	
Situações	Tempo Gasto (minutos)
Abastecimento	25
Almoço ou Jantar	40
Descanso em viagens longas	20
Lanche	20

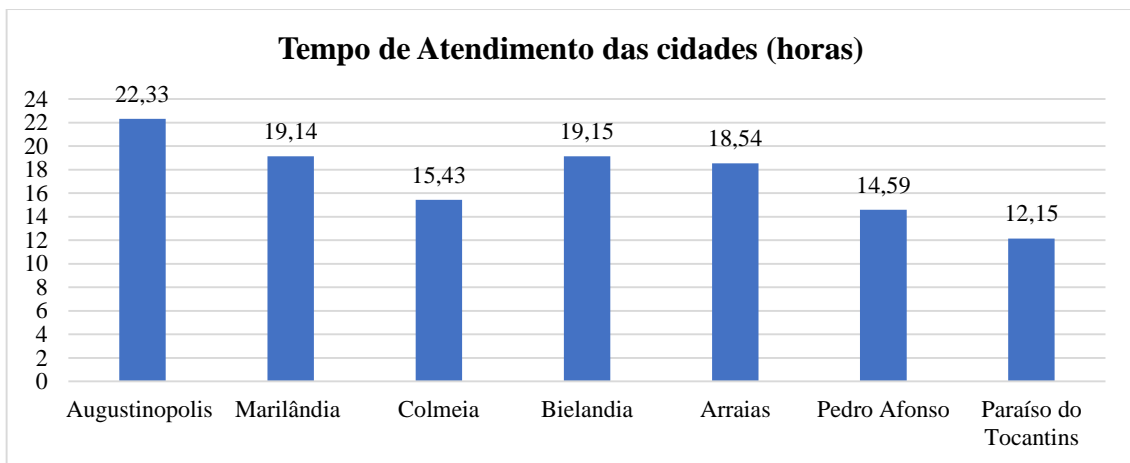
Fonte: Própria Autoria (2022)

É importante considerar também as condições adversas que podem aparecer durante o trajeto, como fatores climáticos, problemas no veículo, má condição das estradas, engarrafamentos, rodízios, barreiras, balsas, etc. Para essas condições a concessionária adota um acréscimo de até 20% no tempo final.

5 RESULTADOS

Analisando os tempos de atendimento/recomposição, é possível perceber que as cidades mais longes de Palmas-TO possuem um tempo de atendimento maior, e as cidades que tem estradas não pavimentadas também possuem essa dificuldade. A Figura 24 mostra o tempo, para cada município. Para esses valores não foram consideradas as condições adversas da estrada e nem as pausas.

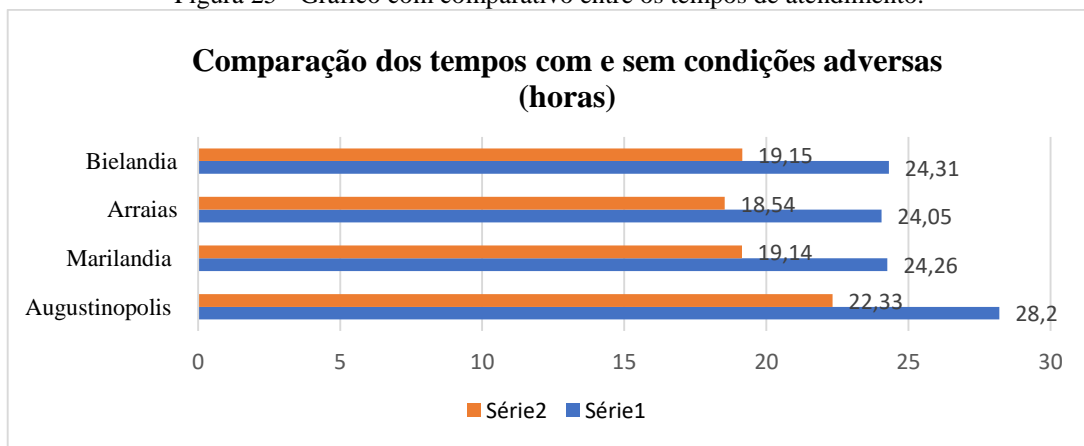
Figura 24 - Gráfico com os tempos de atendimento das cidades do Tocantins.



Fonte: Própria Autoria (2022).

Foi construído também um gráfico para as cidades mais distantes considerando as condições adversas do trajeto, uma pausa para almoço ou jantar, uma pausa para descanso e um abastecimento. A Figura 25 apresenta essa comparação, onde a série 1 é a representação dos tempos com as condições adversas e pausas e a série 2 sem as condições adversas.

Figura 25 - Gráfico com comparativo entre os tempos de atendimento.



Fonte: Própria Autoria (2022).

As cidades que possuem mais de uma alimentação e que são ligadas com outras subestações, podem ter sua demanda temporariamente suprida pela a subestação mais próxima, devido a possibilidade de realização de manobras para deslocar fornecimento emergencial de uma SE para outra. Desse modo os clientes não sofrem interrupção por todo período de deslocamento da subestação móvel, montagem e conexões do transformador.

Todavia esses transtornos poderiam ser evitados se todas as subestações pudessem contar com um transformador reserva já disponível em paralelo aos transformadores que estão em operação, desse modo, quando houver um problema com os transformadores principais os transformadores reservas poderão entrar em operação em questão de minutos.

Embora algumas SEs possam operar com mais de um transformador funcionando em paralelo, em caso de problemas em um deles, é grande a possibilidade de que os outros sofram sobrecarga e possíveis danos. Por esse motivo é importante que haja um transformador reserva capaz de suprir a demanda do equipamento com defeito, fazendo com que não haja interrupção de energia por muito tempo, e evitando danos nos demais equipamentos.

A maior parte das distribuidoras de energia não possuem um transformador reserva em cada subestação, devido ao fato desse tipo de equipamento se tornar um ativo imobilizado, ou seja, representa recursos financeiros parados que poderiam ser utilizados para outras melhorias na distribuição. Uma alternativa para esse problema são as subestações móveis, que garantem que a demanda emergencial seja atendida sem que haja um tempo muito elevado de interrupção. Essa alternativa é funcional pois os incidentes nos transformadores das SEs são de baixíssima frequência.

Se comparado ao que aconteceu em 2020 no Amapá, esses tempos estimados para as cidades do Tocantins são relativamente baixos. No Amapá após o incêndio no transformador, a demanda de energia levou 22 dias para ser 100% atendida novamente. Já nas cidades tocantinenses citadas no trabalho a recomposição levaria uma quantidade significativamente menor de tempo.

No caso do amapá só existe uma linha de transmissão ligando a subestação de Macapá ao SIN, o que fez com que a subestação em questão não tivesse sua demanda suprida pelas outras mais próximas. No caso do Tocantins, o estado faz parte da linha dorsal do SIN, isso significa que em caso de ocorrências em uma de suas subestações, as SEs mais próximas poderiam auxiliar no suprimento da demanda, o que diminuiria o tempo para atendimento.

6 CONCLUSÃO

A partir desse trabalho de conclusão de curso foi possível entender a importância de se ter um transformador reserva instalado em uma subestação de distribuição de energia, pois a partir disso não é necessário utilizar uma subestação móvel, levando em consideração o período de deslocamento. Porém, a utilização de subestações móveis acaba sendo a solução mais viável quando não há um transformador reserva na SE.

Assim como apresentado no Capítulo 1, os principais equipamentos para o funcionamento de uma subestação são: transformador de força, transformador de potencial, transformador de corrente, banco de baterias, transformador auxiliar, retificadores, relés, disjuntores, chaves seccionadoras, para raios, dispositivos de aterramento e parede corta fogo. É importante manter esses equipamentos devidamente ensaiados e realizar manutenções preventivas para que não apareçam problemas inesperados.

É recomendado que uma subestação contenha mais de uma alimentação, pois quando ocorrer algum problema em alguma alimentação haverá outra para suprir as necessidades da SE. Dois ou mais circuitos paralelos em um mesmo barramento devem ter a mesma tensão tanto no lado primário quanto no lado secundário, enquanto circuitos com o mesmo barramento primário e barramentos secundários diferentes podem ou não ter as mesmas tensões de saída.

No Capítulo 4 foi apresentado o blecaute que ocorreu no estado no Amapá. Se a subestação fosse atendida por mais de uma linha do SIN outras subestações poderiam suprir a alimentação durante o período de recomposição. Se houvesse um transformador reserva devidamente ensaiado e com a manutenção em dia, esse transformador poderia suprir a demanda do transformador incendiado e a interrupção de energia ocorreria em um intervalo de tempo relativamente curto. Como não haviam essas medidas de precaução, o estado passou por um período de 22 dias de racionamento de energia, devido ao fato de a unidade geradora do estado não conseguir suprir a 100% da demanda.

Uma sugestão para trabalhos futuros, poderia ser um estudo detalhado do impacto financeiro de instalar transformadores reservas em todas as subestações de distribuição no estado do Tocantins. Outra sugestão seria elaborar um novo método para a distribuidora do Tocantins para que se possa diminuir o tempo de recomposição quando ocorrer uma emergência nas subestações.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13231**. Proteção contra incêndios em subestações elétricas. 1994. Rio de Janeiro.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13859**. Proteção contra incêndios em subestações elétricas de distribuição. 1997. Rio de Janeiro.

ARAUJO, Daniel C. P. et al. **A experiência da CEMIG em monitoramento e diagnóstico de Para-raios em subestações de 69KV e 138KV**. 2005.

AREVA, Transmissão e Distribuição de energia. **Fundamentos de Subestações de Alta Tensão**. 2005.

ARTECHE. **Transformadores De Potencial Para Serviços Auxiliares Ssvt**. [s. d.]

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5356- Transformadores de potência**. Rio de Janeiro, 2016.

BARROS, João Victor Cavalcante. **Sistema multiagente para recomposição automática de subestação e redes de distribuição de energia elétrica**. 2013. Dissertação de Pós-Graduação. Universidade Federal do Ceará.

BECHARA, Ricardo. **Análise de falhas de transformadores de potência**. 2010. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

BELCHIOR, Fernando. **Transformadores para instrumentos. Disciplina de Medidas Elétricas**. 2014. Apresentação. Universidade Federal de Itajubá.

BHSE. **Você sabe o que é uma Subestação Elétrica?**. Disponível em: < <https://www.bhse.com.br/post/voc%C3%AA-sabe-o-que-%C3%A9-uma-subesta%C3%A7%C3%A3o-el%C3%A9trica> >. Acesso em: 05/01/2022.

CORDEIRO, Matos Fernandes Grott Siqueira Oliveira. **Análise da recomposição do sistema de distribuição do Amapá após a perturbação que provocou o blecaute em 3 de novembro 2020**. Brasil. 2021.

DA SILVA, Diego Pereira. **Sistema de testes de módulo de paralelismo de transformadores de força**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Sul de Santa Catarina.

DHAKAL, P. **Computer aided design of substation switching schemes**. 2000. Topology. University of Saskatchewan.

DOCPLAYER. **Transformador de corrente, potencial e bobinas de Rogowski para fins de proteção**. 2014. Disponível em: < <https://www.google.com/amp/s/docplayer.com.br/amp/11880727-Capitulo-i-transformadores-de-corrente-potencial-e-bobinas-de-rogowski-para-fins-de-protecao-parte-1-por-claudio-mardegan.html> >. Acesso em: 15 Jun. 2021

ELECTRA. **Relé Detector de Gás Tipo Buchholz**. 2008. Versão 1.01

FERREIRA, Ribamar Nelson. **Elaboração de um Guia para a Seleção de Relés em Redes Isoladas**. 2012. Dissertação. Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.

FILHO MAMEDE, João. **Manuel de equipamentos elétricos**. 2013. 3ª Edição.

FILHO, Alceu Sartor. **Sistema Especialista para auxílio à recomposição de subestações de transmissão da fase fluente**. 2002. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina.

FILHO, João Mamede. **Subestações de potência: tudo o que você precisa saber**. 2020. Disponível em: < <https://genexatas.com.br/subestacoes-de-potencia-tudo-o-que-voce-precisa-saber/> >. Acesso em: 13 jan. 2022.

FREITAS, Renato Almeida. **Geração de Manobras Finais de Recomposição de Subestações do Sistema Elétrico**. 2015. Dissertação de Pós-Graduação. Universidade Federal de Campina Grande.

GLOBO, Comunicações S/A. **Laudo inicial descarta que raio tenha causado incêndio que provocou apagão no Amapá**. Disponível em: < <https://g1.globo.com/ap/amapa/noticia/2020/11/11/laudo-inicial-descarta-que-raio-atingiu-e-causou-incendio-em-transformador-que-provocou-apagao-no-ap.ghtml> >. Acesso em: 08 Jan. 2022.

GUIMARÃES, Pablo. **Quais testes são realizados no transformador**. 2020. Disponível em: < <https://www.pbloguimaraes-professor.com.br/post/quais-testes-s%C3%A3o-realizados-no-transformador> >. Acesso em: 22 jul. 2021.

JUNIOR, Corrêa Junior. **Comissionamento De Transformadores 13.8/500 Kv Da Usina Hidrelétrica De Tucuruí**. 2010. Trabalho de Graduação. Universidade Federal do Pará.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 2012. Universidade Federal de Santa Catarina.

LEMOZY, Norberto A. **Circuitos Magnéticos y Transformadores**. Ed Reverté, 2010.

MAIA, Marcelo Alexandre. **Plano de Contingência de Transformadores e Reatores para Atendimento à Contingências**. 2019. Tocantins.

MALAFAIA, Matheus Galluzzi. **Sistema de proteção de transformadores de extra-alta tensão utilizando relés digitais**. 2017. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações Elétricas Industriais**. 2017. 9ª Edição.

MENDES, André e BRANDÃO, John. **Principais proteções de transformadores de potência de 765kV: Análise e implementações das principais funções de proteção em transformadores de alta tensão**. 2016. Apresentação.

MENDES, Vênus Liria Silva. **Dimensionamento de Estoques de Transformadores em Sistemas de Potência Considerando Falhas Reparáveis e Catastróficas**. 2020. Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

MONTEIRO, Felipe Gonçalves e DA SILVA, Rafael Cesar. **Proteção de transformadores de potência com ênfase em controle e monitoramento térmico**. 2019. Projeto de Graduação. Instituto Ensinar Brasil.

NEWMAX. **Cuidados na instalação de bancos de baterias**. Disponível em: < <https://newmax.com.br/cuidados-na-instalacao-de-bancos-de-baterias/> > Acesso em: 09 Jun. 2021.

OLIVEIRA, A. L. **Sistema Elaborador de Sequenciamento de Manobras**. Artigo. S/D. USP.

ONS. **Análise da Perturbação do Dia 03/11/2020 às 20h48min com Início nos Transformadores de 230/69/13,8kV da SE Macapá, com Desligamento da UHE Coaracy Nunes e do Sistema Amapá**. 2020. Rio de Janeiro.

PODELESKI, Fabiana da Silva. **Recomposição De Sistemas De Distribuição De Energia Elétrica Por Modelo De Fluxo De Corrente Ótima**. 2017. Dissertação de Pós-graduação. Pontifca Universidade Católica de Campinas.

POWERBRAS. **Flatpack Power Systems**. Disponível em: < <https://www.powerbras.net/> >. Acesso em: 29 Mai. 2021.

QUALITROL, Defining Rellablilty. **Válvulas de alívio de pressão**. Disponível em: < <https://www.qualitrolcorp.com.br/products/pressure-controls-gauges-and-relays/pressure-relief-devices/> >. Acesso em: 10 Abr. 2021.

ROCHA, Geraldo. **Sistema de Monitoramento de Subestações de Distribuição**. 2016. Artigo. Schweitzer Engineering Laboratories.

ROMERO, M. et al. **Alocação de chaves para transferência automática de cargas entre subestações de distribuição de energia elétrica**. 2009. Artigo.

RTA. **Retificadores chaveados modulares industriais e telecomunicação**. Disponível em: < <https://www.rta.com.br/produtos/retificador-modular/> >. Acesso em: 25 Mai. 2021.

SANTOS, Gustavo Gonçalves. **Paralelismo de Transformadores e Transitório de Magnetização de Transformadores**. [s/D]. Universidade de São Paulo.

SILVA, Marcio Gabriel Melo. **Avaliação de Desempenho de Relés de Proteção Digitais**. 2012. Projeto de Graduação. Universidade Federal do Rio de Janeiro.

TAKANO, Michele Ogawa. **Anteprojeto De Um Sistema Digital De Proteção e Controle Aplicado Em Uma Subestação Elétrica Industrial**. 2011. Trabalho de Graduação. Universidade Estadual Paulista.

TECNOGERA. **Categoria subestação móvel**. Disponível em: < <http://www.tecnogera.com.br> >. Acesso em: 23 Dez. 2021.

TREVISOL, Fernanda Coelho. **Sistema de proteção contra descargas atmosféricas em subestação de média e alta tensão**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

WEBSTARSNET. **Relé de Buchholz - construção, trabalhando.** Disponível em: <<https://webstarsnets.com/pt/113-buchholz-relay-construction-working.html>>. Acesso em: 15 Jun. 2021.

WEG. **Manual de operação da SE Móvel.** Blumenau, SC.2015

WEG. **Transformadores WEG de 300 MVA - 500 kV chegam no porto do Pecém no Ceará, rumo a parque eólico no Rio Grande do Norte,** Blumenau-SC. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/news/produtos-e-solucoes/transformadores-weg-de-300-mva-500-kv-chegam-no-porto-do-pecem-no-ceara-rumo-a-parque-eolico-no-rio-grande-do-norte>>. Acesso em: 21 jul. 2021.