



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ROGENILTON VIEIRA GOMES DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE CHAVES SINCRONIZADORAS EM
MANOBRAS ASSOCIADAS A TRANSFORMADORES NO SISTEMA ELÉTRICO
DE POTÊNCIA**

Recife

2022

ROGENILTON VIEIRA GOMES DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE CHAVES SINCRONIZADORAS EM
MANOBRAS ASSOCIADAS A TRANSFORMADORES NO SISTEMA ELÉTRICO
DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica

Orientador(a): Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Recife

2022

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Silva Júnior, Rogenilton Vieira Gomes da.

Análise da aplicabilidade de chaves sincronizadoras em manobras associadas a transformadores no sistema elétrico de potência / Rogenilton Vieira Gomes da Silva Júnior. - Recife, 2022.

72 p. : il.

Orientador(a): Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica - Bacharelado, 2022.

Inclui referências, anexos.

1. Sistema Elétrico de Potência. 2. Transformador. 3. IED. 4. Subestação. 5. Chaveamento controlado. I. Aquino, Ronaldo Ribeiro Barbosa de . (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

ROGENILTON VIEIRA GOMES DA SILVA JÚNIOR

**ANÁLISE DA APLICABILIDADE DE CHAVES SINCRONIZADORAS EM
MANOBRAS ASSOCIADAS A TRANSFORMADORES NO SISTEMA ELÉTRICO
DE POTÊNCIA**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para obtenção do grau de Bacharel
em Engenharia Elétrica

Aprovado em: 20/10/2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Douglas Contente Pimentel Barbosa (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Guilherme Delgado Soriano (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho à minha família, que sempre será meu suporte e aos meus caros amigos de jornada, pois sem todos eles o caminho seria muito mais tortuoso.

AGRADECIMENTOS

Penso que a gratidão é um dos maiores sinais de que uma determinada jornada valeu a pena e é muito por esse motivo que, através desse texto, venho agradecer às pessoas mais importantes da minha vida, porque, sem elas, atravessar todo esse caminho seria muito mais tortuoso.

Aos meus pais, Rogenilton e Virgínia, sou grato por alicerçarem minha construção pessoal, pelos momentos de consolo, conselho, carinho e afeto. Ao meu irmão, João Victor, sou grato pelo companheirismo e por não medir esforços em ajudar. Ao meu avô, Manoel, que tenho como segundo pai, agradeço por sempre estar por perto, sejam nos bons ou maus momentos.

Aos companheiros de graduação sou grato pelas brincadeiras e risadas que tornaram o processo mais leve e natural, pelos conselhos em momentos de tristeza e por toda troca que tivemos durante esses quase 6 anos de convivência quase que diária. Em especial, sou extremamente grato a dois amigos que, entre muitos, levo pra vida: Alex Ferraz e Wedson Cavalcanti.

Nutro enorme gratidão por todos os professores que contribuíram de algum modo para o meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço ao Prof. Dr. Zanoni Dueire Lins por toda dedicação e conselhos, bem como ao Prof. Dr. Ronaldo Ribeiro Barbosa de Aquino pela confiança e total dedicação no esclarecimento de dúvidas durante a graduação, bem como na construção desse trabalho.

Por fim, mas não menos importante, gostaria de agradecer à toda família da INTEREST Engenharia por ter confiado em mim e aberto as portas para o início de minha jornada profissional. Cada integrante da equipe elétrica teve e tem uma contribuição especial durante esses quase 12 meses de jornada.

.

RESUMO

Com o desenvolvimento da tecnologia, principalmente entre os séculos XIX e XX, a energia elétrica adquiriu notória importância devido à capacidade que foi associada a ela de ser convertida em outras formas de energia tornando-a essencial em diversos processos industriais e em aspectos relacionados à qualidade de vida da população num geral. Nesse contexto os sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia passaram por diversos processos de evolução, culminando nos chamados Sistemas Elétricos de Potência (SEP). Devido à toda essa importância, tais sistemas precisam ser dotados de alta confiabilidade, contudo como sua complexidade evoluiu de maneira proporcional a sua importância, fontes de distúrbios capazes de gerar impactos econômicos e sociais de grande monta também se fazem presentes. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo apresentar os problemas relacionados a manobras de transformadores de potência e como é possível mitigar tais inconvenientes através da aplicação de um IED (*Intelligent Electronic Devices*) denominado de chave sincronizadora para realização do chaveamento controlado.

Palavras-chave: Sistema Elétrico de Potência. Transformador. IED. Subestação. Chaveamento Controlado.

ABSTRACT

With the development of technology, especially between the 19th and 20th centuries, electric power acquired notorious importance due to the capacity that was associated with it to be converted into other forms of energy, making it essential in several industrial processes and in aspects related to the quality of life of the population in general. In this context, power generation, transmission, and distribution systems have gone through several evolution processes, culminating in the so-called Electric Power Systems (EPS). Because of their importance, such systems need to be highly reliable, but as their complexity has evolved proportionally to their importance, sources of disturbance capable of generating major economic and social impacts are also present. Therefore, this paper aims to present the problems related to power transformer switching and how it is possible to mitigate such inconveniences by applying an IED (Intelligent Electronic Devices) called synchronizer switch for controlled switching.

Keywords: Electric Power System. Transformer. IED. Substation. Controlled Switching.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Sistema Interligado Nacional	15
Figura 2 - Subestação Itapebi/BA.....	19
Figura 3- Trecho de Diagrama Unifilar da SE Funil/BA	20
Figura 4 - Transformador de Potência.....	21
Figura 5 - Demonstração da Lei de Faraday-Lenz	23
Figura 6 - Laço de histerese.....	24
Figura 7 - Diagrama fasorial da corrente de excitação de transformadores	25
Figura 8 - Circuito Equivalente de um Transformador	26
Figura 9 - Disjuntores de Alta Tensão	27
Figura 10 - Esquema de contatos de um disjuntor	28
Figura 11 – Equivalente monofásico de um circuito com carga indutiva	30
Figura 12 - Resposta natural de um circuito RLC.....	31
Figura 13 - Influência do fluxo remanente na corrente de inrush	34
Figura 14 - Tensão de energização, densidade de fluxo e corrente de magnetização em função do tempo.....	35
Figura 15 - Chave Sincronizadora (PSD)	36
Figura 16 - Princípios de temporização de abertura monopolar.....	40
Figura 17 - Princípio da temporização do fechamento monopolar controlado	44
Figura 18 - Energização de um transformador trifásico sem fluxo residual.....	46
Figura 19 - Fluxos residual e presumível de um transformador trifásico	47
Figura 20 - Diagrama Unifilar - Vão 04T1	48
Figura 21- Vista Geral da Mesa de Operação do SAGE	50
Figura 22-Multimedidor Trifásico	50
Figura 23 - Derivação dos sinais de corrente e tensão para o sincronizador	51
Figura 24 - Entradas Analógicas do Sincronizador	52
Figura 25 - Painéis de Serviços Auxiliares 125Vcc	53
Figura 26 - Distribuição de Polaridades para o Pannel	54
Figura 27 - Relé Biestável	55
Figura 28 - Multiplicação de sinal da chave de comando CLT	55
Figura 29 – Relés de Telecomando	56
Figura 30 - Sinalização de Falha Interna do Sincronizador	57

Figura 31 - Lógica para habilitar ou desabilitar o Sincronizador.....	58
Figura 32 - Entradas digitais para sinalização de posição do disjuntor	59
Figura 33 - Painel de Comando do Vão 04T1	60
Figura 34 - Entradas digitais para lógicas de abertura e fechamento sincronizado ..	60
Figura 35 - Comandos em nível 1 e 2 do disjuntor 14T1	61
Figura 36 - Saídas digitais para comandos de abertura e fechamento sincronizado	62
Figura 37 - Trecho do Esquema Interno do Disjuntor.....	63
Figura 38 - Vista Frontal do painel com a porta aberta	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente contínua
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCEM	Força contra-eletromotriz
IED	<i>Intelligent electronic devices</i>
kV	kiloVolt
MME	Ministério de Minas e Energia
MVA	Megavolt-ampère
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
SEP	Sistemas Elétricos de Potência
SAGE	Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia
SPCS	Sistemas de Proteção, Controle e Supervisão
TAC	Teste de Aceitação de Campo
TAF	Teste de Aceitação de Fábrica
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
TWh	Terawatt-hora
UTR	Unidade Terminal Remota

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Capacitância
k	Constante de proporcionalidade do sistema
$i(t)$	Corrente em função do tempo
$f_{amostragem}$	Frequência de amostragem do sinal de tensão
s	Frequência natural de oscilação do sistema
ω_0	Frequência de oscilação do sistema
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
L	Indutância
n_{ciclos}	Número de ciclos para concluir manobra sincronizada
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo
R	Resistência
t_{abert}	Tempo de abertura compensado por fatores ambientais e de histórico
$t_{abertura(a,A)}$	Tempo de abertura da fase A, utilizando a fase A como referência
$t_{abertura(b,B)}$	Tempo de abertura da fase B, utilizando a fase B como referência
$t_{abertura(c,C)}$	Tempo de abertura da fase C, utilizando a fase B como referência
$t_{abertura(b,A)}$	Tempo de abertura da fase B, utilizando a fase A como referência
$t_{abertura(c,A)}$	Tempo de abertura da fase C, utilizando a fase A como referência
t_{arco}	Tempo de arco entre os contatos do disjuntor
t_{delay}	Tempo de atraso de manobra entre fases
t'_{abert}	Tempo de abertura do disjuntor compensado por fatores ambientais
$t_{ensaiado}$	Tempo de abertura do disjuntor ensaiado
t_{abert_med}	Tempo de abertura medido
t_{espera}	Tempo de espera para início da manobra sincronizada
t_{fech}	Tempo de fechamento mecânico dos contatos do disjuntor
t_{inativ}	Tempo de inatividade do disjuntor
V_{cc}	Tensão contínua
U_m	Tensão da fonte
v_n	Tensão de abertura na n-ésima manobra
v_{n+1}	Tensão de abertura na n+1-ésima manobra
v_c	Tensão instantânea no capacitor

v_l	Tensão instantânea no indutor
Δt_{seq}	Variação de tempo de manobra do disjuntor com manobras em sequência
Δt_{temp}	Variação de tempo de manobra do disjuntor com a temperatura
$\Delta t_{tensão}$	Variação no tempo de manobra do disjuntor com a tensão
Δt_{carreg}	Variação no tempo de manobra do disjuntor com o carregamento do sistema de atuação
Δt_{inativ}	Variação de tempo de manobra do disjuntor com o tempo de inatividade
\vec{B}	Vetor indução magnética

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	16
1.2	MOTIVAÇÃO	16
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Geral	17
1.3.2	Específicos.....	17
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	SUBESTAÇÕES.....	19
2.2	TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA.....	21
2.2.1	Princípio de funcionamento	22
2.2.2	Modelagem de um transformador real.....	25
2.3	DISJUNTORES	26
2.3.1	Princípio de funcionamento	27
2.4	TRANSITÓRIOS NA ABERTURA DE TRANSFORMADORES.....	29
2.5	TRANSITÓRIOS NO FECHAMENTO DE TRANSFORMADORES.....	33
2.6	MITIGAÇÃO DE EFEITOS TRANSITÓRIOS EM TRANSFORMADORES ..	36
2.6.1	Abertura controlada em manobras com transformadores	37
2.6.2	Fechamento controlado em manobras com transformadores	41
2.6.3	Fechamento controlado em transformadores tripolares	45
3	CONTEXTO DO ESTUDO DE CASO	48
3.1	SOLUÇÃO ENCONTRADA PARA A SUBESTAÇÃO.....	49
3.2	ENTRADAS ANALÓGICAS PARA SINCRONIZAÇÃO	50
3.3	PAINEL DO SINCRONIZADOR.....	52
3.3.1	Habilitação do sincronizador.....	54

3.3.2	Entradas digitais para sincronismo	58
3.4	PROJETO CONSTRUTIVO DO PAINEL.....	63
3.5	TESTES DE ACEITAÇÃO	65
3.6	CONFORME CONSTRUÍDO.....	65
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	67
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS	69
	REFERÊNCIAS	70
	ANEXO A – DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO EM ESTUDO.....	72

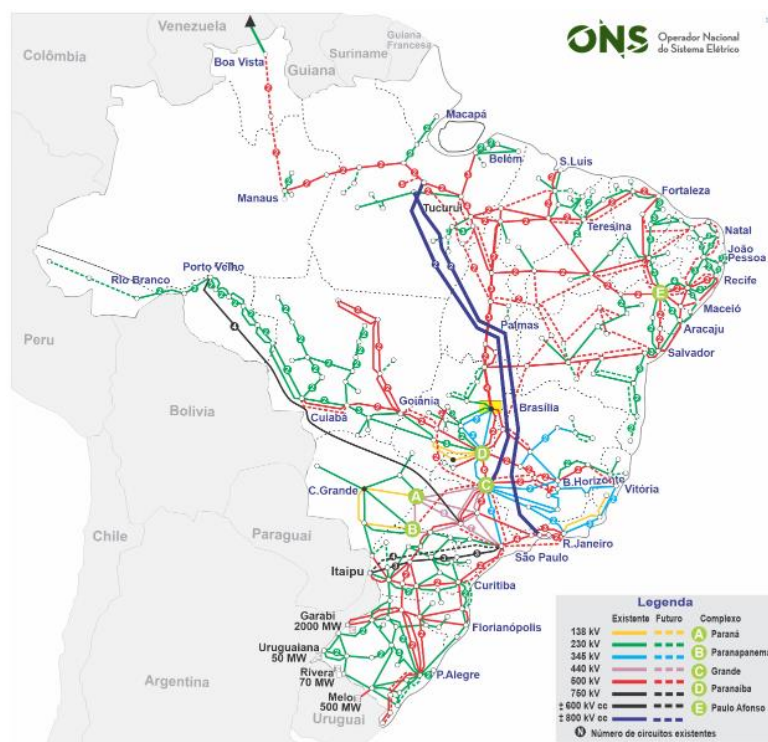
1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica pode ser transformada, com relativa facilidade, em outras formas de energia, tornando-a amplamente necessária para o desenvolvimento de qualquer país (BICHELS, 2018).

O crescimento das cargas veio acompanhado do aumento da necessidade de maiores potências de geração, ou seja, as fontes motrizes mais distantes dos grandes centros consumidores necessitavam ser aproveitadas (JR., 2006). Tal fato trouxe consigo a necessidade de desenvolvimento de projetos de linhas de transmissão cada vez mais longas e de tensões de transmissão cada vez mais elevadas através da utilização de subestações, fazendo surgir os Sistemas Elétricos de Potência (SEP) como conhecemos atualmente (BICHELS, 2018).

A Figura 1 apresenta o horizonte para 2024 das interconexões a serem realizadas no Sistema Elétrico Brasileiro. Nela é possível observar a complexidade que é assumida por tal sistema, fazendo surgir, consequentemente, uma enorme necessidade de confiabilidade e continuidade operacional.

Figura 1- Sistema Interligado Nacional



Fonte: ONS (2022).

1.1 Contextualização

No ano de 2021 houve um aumento de 5,7% no consumo de energia elétrica, atingindo 570,8 TWh, sendo os setores industrial e residencial dotados de maior destaque nessa evolução contabilizando, respectivamente, 37% e 26% de crescimento (EPE, 2022).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no cenário de referência, espera-se que a carga de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) cresça à taxa média de 3,4% a.a. entre 2021 e 2031 (EPE e MME, 2022). Evidenciando, dessa forma, que o sistema elétrico deve ser cada vez mais confiável e eficiente.

Nesse contexto é de extrema importância que seja possível contar com sistemas de geração, transmissão e distribuição que garantam a segurança e manutenção do fornecimento de energia elétrica para os consumidores, aliando isso ao menor custo possível (CAMPOS e ESTEVAM, 2020).

As subestações têm papel importante nesse processo, já que contam com sistemas de proteção, controle e supervisão (SPCS) que, em conjunto, têm como um de seus objetivos proteger a integridade do sistema e das pessoas bem como melhorar a qualidade da energia elétrica a ser fornecida aos consumidores finais (MARTINS, 2020).

A função realizada pelas subestações se deve à realização de manobras envolvendo determinados equipamentos, onde tais situações são capazes de gerar condições transitórias como sobretensões, falhas, atuações inadequadas dos sistemas de proteção e até interrupção do fornecimento de energia para consumidores com cargas sensíveis (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Esse transitórios podem ser mitigados ou até mesmo eliminados a partir da utilização de alguns artifícios como resistores de pré-inserção bem como através do chaveamento controlado (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

1.2 Motivação

Com o intuito de promover a melhoria do sistema como um todo, várias subestações estão sujeitas a passar por um processo conhecido como *retrofit*. Esse

é um termo associado a revitalização, reforma, renovação ou modernização de instalações.

Com a difusão dos microcontroladores e microprocessadores, através do desenvolvimento da eletrônica digital, foi possível desenvolver equipamentos capazes de aglutinar, em única estrutura, diversas funcionalidades, como relés de proteção e chaves sincronizadoras, ficando conhecidos como IEDs (*Intelligent Electronic Devices*) (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Tais chaves sincronizadoras, ao serem combinadas com disjuntores, são capazes de melhorar a qualidade da energia fornecida, fazer os sistemas de proteção atuarem de maneira correta e prolongar a vida útil dos ativos das transmissoras de energia (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Para os transformadores de potência, a energização, num instante qualquer, pode ser capaz de gerar correntes de altas magnitudes, conhecidas como correntes de *inrush* podendo levar a estresses nos dielétricos desses equipamentos (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014). Deste modo, a aplicação do fechamento sincronizado de disjuntores associados aos transformadores evita transtornos ao próprio equipamento, sua vizinhança e o sistema elétrico como um todo.

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

O objetivo geral do trabalho é fornecer o conhecimento teórico em conjunto com a aplicação prática do desenvolvimento de um projeto para implementação de um dispositivo sincronizador em uma subestação de 230 kV, pertencente à rede básica.

1.3.2 Específicos

Quanto aos objetivos específicos, é proposto:

- Apresentar o conhecimento teórico referente aos equipamentos elétricos manobráveis e a serem manobrados em questão;
- Fornecer embasamento teórico acerca dos fenômenos atrelados ao chaveamento destes equipamentos;
- Expor a metodologia associada ao funcionamento das chaves sincronizadoras;
- Realizar um estudo de caso quanto à metodologia associada a implementação de um painel sincronizador em uma subestação 230 kV;

1.4 Organização do Trabalho de Conclusão de Curso

Dados os objetivos propostos neste primeiro capítulo com teor introdutório, o presente trabalho segue com a apresentação, no Capítulo 2, de conhecimentos teóricos associados aos equipamentos de potência, onde são apresentadas suas características construtivas e elétricas, bem como são expostas as condições transitórias geradas durante suas manobras.

O Capítulo 3 é destinado a demonstrar, através de um estudo de caso, como o é executado um projeto de instalação de um sincronizador em uma subestação da rede básica. Num geral, a chave sincronizadora é parametrizada para operar em conjunto com disjuntores que manobram transformadores de potência, trazendo também a contribuição que tal método traz para o sistema elétrico em comparação a outros.

No Capítulo 4 são realizadas análises, referentes às etapas de projeto, do estudo de caso no que diz respeito a troca de um disjuntor de 230 kV com a utilização de um sincronizador, trazendo assim os pontos a serem levados em conta em futuros projetos para situações similares.

Por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais do trabalho, assim como as conclusões relacionadas ao dispositivo e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Subestações

Uma subestação pode ser definida como uma instalação que funciona como um ponto de convergência para linhas de transmissão e/ou distribuição onde há sistemas de medição, proteção, controle, transformação entre outros, que visam garantir a segurança das pessoas e equipamentos envolvidos no processo, a qualidade de energia através do controle de reativos e dos níveis de corrente e tensão bem como a interligação do sistema elétrico, direcionando o fluxo de energia entre fontes e cargas (CAMPOS e ESTEVAM, 2020).

A Figura 2 mostra, numa vista aérea, uma subestação da rede básica onde é possível visualizar o conjunto de estruturas civil, eletromecânica e elétrica.

Figura 2 - Subestação Itapebi/BA



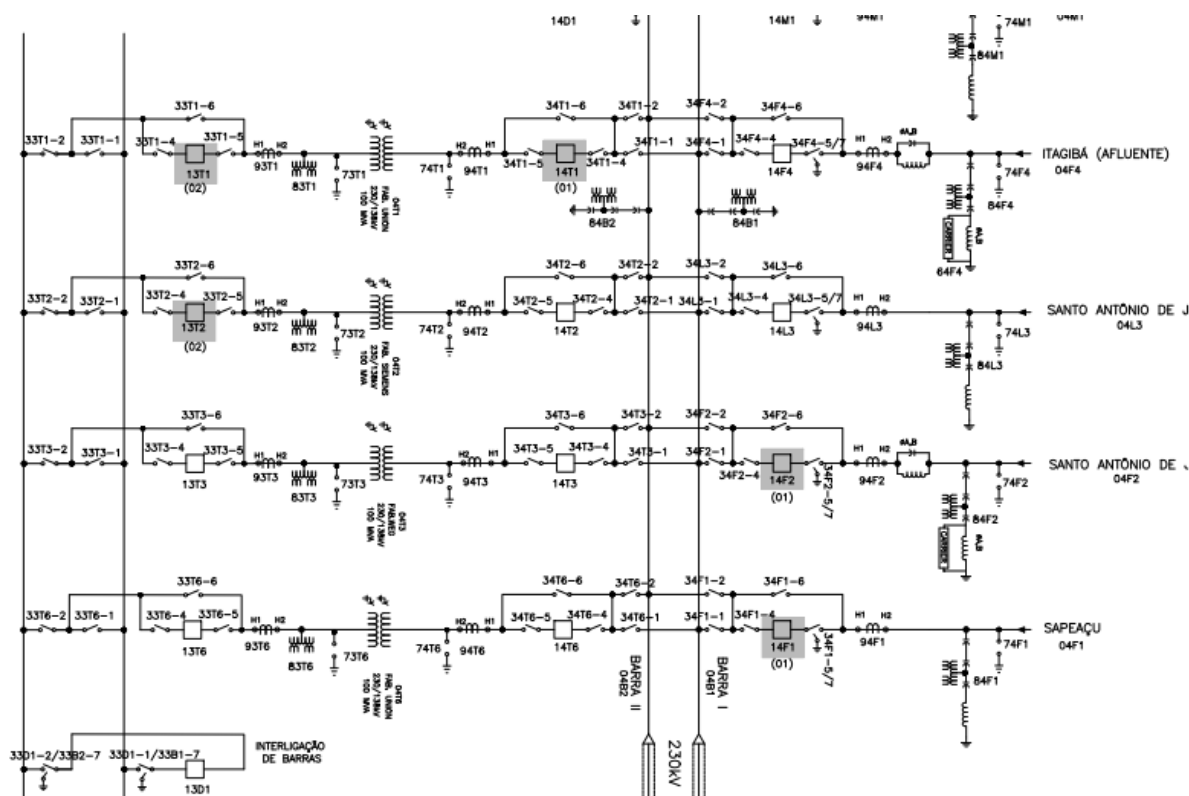
Fonte: Chesf (2022).

Para garantir que tais funcionalidades associadas às subestações sejam executadas da maneira mais segura possível, as linhas de alta tensão que chegam a essas instalações não podem se conectar diretamente a ativos como transformadores

de potência, reatores ou bancos de capacitores. Essa conexão é feita através de um grupo de condutores denominado de barramento e todo ente que se conecta a esse condutor deve fazer isso através de um circuito que contém equipamentos de manobra, como disjuntores e chaves seccionadoras, sistemas de medição, proteção, comando, controle e supervisão. Esses circuitos recebem o nome de vão ou *bay* (CAMPOS e ESTEVAM, 2020).

A Figura 3 mostra um trecho do diagrama unifilar referente aos setores de 230 e 138 kV da SE Funil, localizada na cidade de Ubaitaba, no estado da Bahia.

Figura 3- Trecho de Diagrama Unifilar da SE Funil/BA



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2021).

Segundo resolução normativa n° 67, de junho de 2004, da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) os equipamentos presentes nas subestações são considerados parte da chamada Rede Básica caso operem em níveis de tensão igual ou acima de 230 kV. No caso dos transformadores de potência basta que o enrolamento primário obedeça ao requisito citado anteriormente e isso fará com que

os enrolamentos secundário e/ou terciário, assim como os equipamentos conectados a esse último também façam parte da Rede Básica (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2022).

Além disso, vale salientar que quando tais ativos pertencem à Rede Básica, eles devem seguir regras presentes nos chamados procedimentos de rede do Operador Nacional do Sistema (ONS) que existem para garantir a manutenção da operabilidade do Sistema Elétrico.

2.2 Transformadores de potência

O transformador é um dispositivo capaz de transmitir energia ou potência elétrica de um circuito a outro, transformando tensões e correntes em um circuito de corrente alternada, bem como alterando níveis de impedância do circuito (SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN ET AL, 2013).

A Figura 4 exemplifica a estrutura de um transformador que opera em níveis de tensão de 500 kV e 300 MVA de potência.

Figura 4 - Transformador de Potência



Fonte: WEG (2022).

A grande vantagem da corrente alternada em relação a corrente contínua se deve ao transformador, pois esse equipamento possibilita a obtenção de diversos níveis de tensão praticamente sem perdas a depender do que seja necessário. Por limitações construtivas, o funcionamento mais econômico dos geradores se dá em níveis de tensão próximos a 25 kV. Já para transmissão de blocos de potência por longas distâncias, com o maior rendimento possível, o ideal é estar em níveis de tensão mais elevados de até 1000 kV, enquanto na distribuição de energia, por questões de segurança dos consumidores, é preciso utilizar níveis de tensão inferiores. Portanto a presença de transformadores em qualquer sistema elétrico se faz necessária (SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN ET AL, 2013).

2.2.1 Princípio de funcionamento

Para compreensão de maneira mais assertiva em relação ao que tange o funcionamento dos transformadores num geral, inclui-se o de potência nesse contexto, é necessária a exposição prévia das leis do eletromagnetismo que permitem a atuação desses equipamentos, bem como dos seus aspectos construtivos.

A lei de *Biot-Savart* permite quantificar, através do uso de cálculo vetorial, o valor do campo magnético em qualquer ponto do espaço (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 1996), onde a indução magnética num determinado ponto do espaço \vec{B} é o somatório infinitesimal do produto vetorial entre cada comprimento infinitesimal do condutor $d\vec{l}$ e o vetor distância para o ponto em questão \vec{R} através de uma constante de proporcionalidade que relaciona a corrente que flui pelo condutor i e a permeabilidade magnética do vácuo cujo valor é dado por $4\pi * 10^{-7}$ H/m.

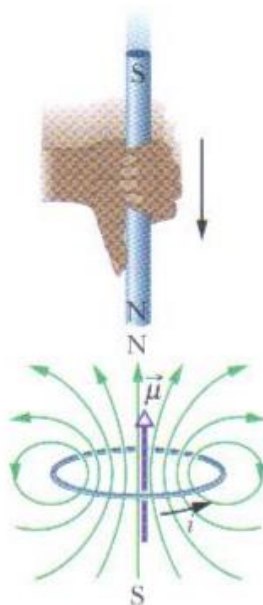
$$\vec{B} = \int \frac{\mu_0 i}{4\pi} * \frac{d\vec{l} \times \vec{R}}{r^3} \quad (1)$$

Sendo possível concluir que uma corrente elétrica, ao fluir por um meio condutor, gera um campo magnético em torno desse. Logo, quando uma fonte é

conectada a um dos enrolamentos do transformador e uma corrente flui por ele, um campo magnético é gerado (SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN ET AL, 2013).

Segundo a lei de *Faraday-Lenz*, quando um fluxo magnético variante no tempo atravessa a área de um condutor, uma tensão induzida é gerada nos terminais dele. Essa força eletromotriz tem polaridade tal que é capaz de produzir uma corrente que gerará um campo magnético capaz de se opor à variação do campo que deu origem a ela (HALLIDAY, RESNICK e WALKER, 1996).

Figura 5 - Demonstração da Lei de Faraday-Lenz



Fonte: Halliday, Resnick e Walker (1996).

A Figura 5 demonstra visualmente como se dá a indução de tensão e corrente em uma espira através da variação de fluxo que a atravessa em função do tempo.

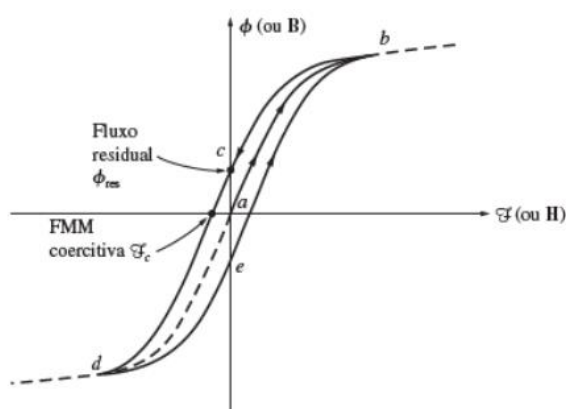
Os materiais ferromagnéticos são conhecidos por possuírem uma permeabilidade relativa muito alta. Essa característica provê a eles grande facilidade em se magnetizar por campos externos (CHAPMAN, 2013).

Esses materiais são formados por regiões onde a magnetização é uniforme, conhecidas como domínios, contudo esses domínios têm orientação aleatória entre si, gerando uma magnetização líquida nula para um estado normal desses materiais.

Ao serem estimulados por um campo externo, os domínios tendem a se alinhar em direção e sentido com ele, gerando um aumento na densidade de fluxo magnético (CHAPMAN, 2013).

A Figura 6 mostra como ocorre a magnetização de um material ferromagnético, partindo dele inicialmente desmagnetizado, no ponto “a” até o ponto “b”. Com a diminuição gradual do campo magnético externo há uma tendência de fazer com que os domínios voltem aos seus estados naturais, contudo algumas dessas regiões permanecem alinhadas de acordo com a orientação do campo prévio, mantendo no ponto “c” um fluxo residual que só é cancelado a partir da aplicação de outro campo, de orientação inversa ao original, de modo a gerar trabalho sob os domínios resistentes os fazendo voltar aos seus estados originais. Com a manutenção desse campo externo é possível chegar ao ponto “d” como outro extremo da indução magnética (UMANS, 2014).

Figura 6 - Laço de histerese



Fonte: Chapman (2013).

Desse modo, quando uma corrente alternada flui pelo enrolamento primário de um transformador um campo magnético é gerado, estas linhas de campo se concentram, em sua maioria, no material ferromagnético componente do núcleo de ferro, fazendo aumentar a densidade de fluxo e permitindo que o fluxo concatene os demais enrolamentos, de modo a induzir tensões nos terminais dos mesmos através de processos de conversão eletromagnética de energia (UMANS, 2014).

2.2.2 Modelagem de um transformador real

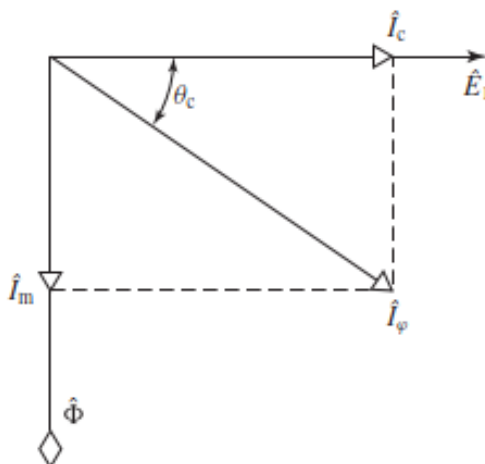
Do aspecto construtivo um transformador consiste em dois ou mais enrolamentos de cobre isolados que envolvem um núcleo feito de material ferromagnético de modo a mantê-los eletricamente isolados, contudo, magneticamente acoplados (UMANS, 2014).

Os enrolamentos de cobre podem ser modelados como circuitos com uma resistência em série com um indutor. Uma corrente elétrica, ao fluir por um condutor, gera perdas térmicas, devido ao efeito Joule, representadas por um resistor para cada enrolamento, R_1 e R_2 (UMANS, 2014).

Para cada enrolamento percorrido por corrente, nem todo o fluxo gerado é capaz de concatenar os demais enrolamentos, sendo esse denominado de fluxo disperso. Esse fluxo é capaz de, somado ao fluxo concatenado, induzir tensões nos enrolamentos do transformador. Como esse fluxo é disperso no ar, material paramagnético, onde não há saturação na prática, a tensão induzida por ele varia linearmente com a corrente/fluxo, fazendo com que essa dispersão possa ser representada por indutores de reatâncias X_1 e X_2 (UMANS, 2014).

Ao se energizar um transformador, mesmo sem carga conectada, uma corrente de excitação, composta por uma componente fundamental e uma sequência de componentes ímpares, é solicitada da fonte (CHAPMAN, 2013).

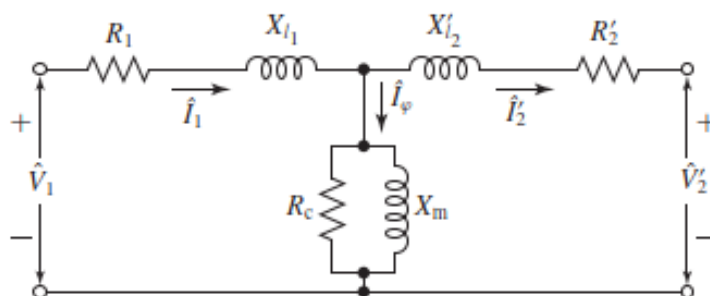
Figura 7 - Diagrama fasorial da corrente de excitação de transformadores



Fonte: Umans (2014).

A Figura 7 mostra, por diagrama fasorial, como a componente fundamental pode ser dividida em duas: uma em fase com a FCEM responsável por fornecer a potência necessária para suprir as perdas por histerese e correntes parasitas, representadas pela resistência R_c . Já a componente atrasada em 90° da FCEM é responsável por gerar o fluxo responsável pela magnetização do núcleo, representada pela reatância X_ϕ (UMANS, 2014).

Figura 8 - Circuito Equivalente de um Transformador



Fonte: Umans (2014).

2.3 Disjuntores

Os disjuntores são equipamentos de manobra cuja função principal é interromper as correntes de defeito de um determinado circuito durante o menor espaço de tempo possível. Contudo, os disjuntores são também demandados a interromper correntes de circuitos operando a plena carga e a vazio, além de energizar os mesmos circuitos em condições de operação normal ou em falta (FILHO, 2013).

Os disjuntores aplicados a subestações estão associados a relés de proteção capazes de analisar grandezas elétricas como tensão, corrente, frequência entre outras e, compará-las a valores parametrizados, de modo a tomar decisões mandatórias de comando sob disjuntores (FILHO, 2013). Do ponto de vista associado às atuações de proteções, um disjuntor deve sempre estar apto a abrir, independentemente de quais consequências essa manobra trará ao sistema elétrico.

Figura 9 - Disjuntores de Alta Tensão



Fonte: Siemens (2019).

Entretanto quando manobras de fechamento e abertura de disjuntores são realizadas de maneira deliberada há um grande cuidado com as consequências que os transitórios gerados podem trazer ao sistema, como pode ser visto no tópico 4.5.4 do Procedimento de Rede 2.6 do ONS, que trata dos requisitos mínimos para subestações e seus equipamentos.

Os disjuntores das unidades transformadoras de potência e dos bancos de capacitores em derivação devem, caso os estudos apontem a necessidade, ser dotados de elementos ou sistemas que limitem os transitórios de energização desses equipamentos, com o intuito de não causar sobretensões, subtensões ou sobrecorrentes que afetem o desempenho da rede ou causem o funcionamento indevido dos sistemas de proteção e controle (ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, 2022).

2.3.1 Princípio de funcionamento

Este tópico, em específico, tratará do princípio de funcionamento do disjuntor que será tratado no estudo de caso que se segue, como uma maneira de introduzir os aspectos que tangem ao referido projeto.

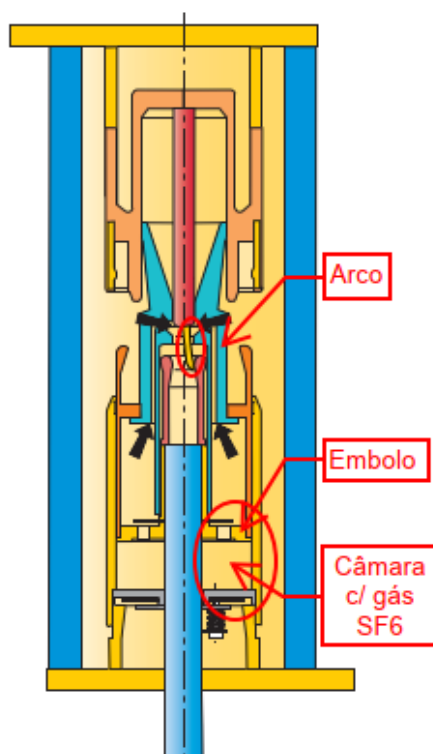
Os disjuntores são equipamentos que possuem dois contatos, sendo um fixo e outro móvel. No processo de abertura, o afastamento entre esses contatos gera um

aumento das perdas ôhmicas devido à diminuição da pressão entre os contatos e presença de dielétrico entre eles, levando a um aumento da temperatura das regiões próximas e ionizando o meio. Esse processo permite que, mesmo após a separação física entre os contatos, haja a manutenção de um arco elétrico (FILHO, 2013).

No caso do equipamento a ser tratado no presente trabalho, o arco elétrico tem sua interrupção dada a partir da utilização do gás SF₆. Por ser um gás altamente eletronegativo, já que o flúor pertence à família dos halogênios, possui uma grande capacidade de atrair elétrons livres do meio, reduzindo a condutibilidade do arco elétrico (SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN ET AL, 2013)

A Figura 10 mostra como se dá o processo de extinção do arco quando da abertura de um disjuntor cujo sistema de extinção se dá a partir da utilização de gás SF₆, onde o curso do contato móvel faz com que um embolo pressione a câmara com gás, de modo a fazer com que ele flua no sentido contrário ao do contato, extinguindo o arco elétrico quando a corrente elétrica passa pelo primeiro zero.

Figura 10 - Esquema de contatos de um disjuntor



Fonte: Adaptado de Siemens (2006).

Para uma operação de fechamento, à medida que os contatos se aproximam um do outro, há uma tendência de a rigidez dielétrica do meio diminuir até um certo ponto onde ocorre uma ruptura dielétrica, que se caracteriza pelo estabelecimento de um arco elétrico. Diz-se que, nesse momento, surge um “pré-arco” (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017). Como a distância entre os contatos continua a diminuir, o arco gradualmente encurta até finalmente os contatos se acoplarem, e o arco desaparece. Então, não apenas na abertura, como também no fechamento, um arco pode aparecer entre os contatos de um disjuntor.

Os fenômenos associados às manobras de disjuntores trazem consigo uma grande complexidade, fazendo com que não haja um modelo universal capaz de simular completamente o comportamento de um disjuntor em condições transitórias. Desse modo, para análises mais simples, um disjuntor pode ser considerado como uma chave (SLUIS, 2001).

2.4 Transitórios na abertura de transformadores

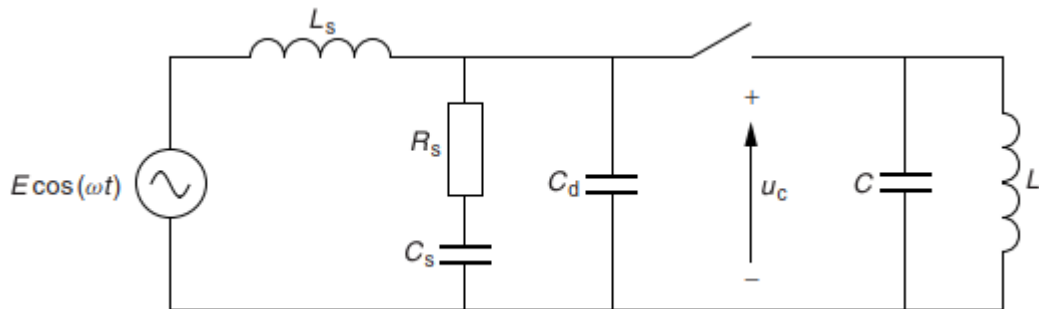
Para a análise de transitórios em transformadores, o modelo apresentado na Figura 8 não se torna suficiente, sendo necessário para tal, representar os efeitos que as capacitâncias presentes entre espiras e entre espiras e terra geram no equipamento (CABRAL, 2003).

Em transitórios rápidos, os efeitos das capacitâncias parasitas de um transformador são muito mais influentes que aspectos relacionados à não-linearidade do material ferromagnético que compõe o núcleo, já para transitórios à frequência industrial, como em correntes de *inrush*, ocorre o inverso (GREENWOOD, 2001).

A Figura 11 mostra, numa representação monofásica, um circuito para análise da interrupção de pequenas correntes indutivas como as solicitadas por um transformador a vazio, ou seja, sem carga. Nesse caso o transformador é modelado de maneira a negligenciar a saturação de seu núcleo e as perdas, além de se considerar que a capacitância dos enrolamentos é igualmente distribuída, logo a representação se dá por um circuito LC.

A indutância L da carga é dominante, o que indica que a corrente da carga está atrasada em relação a tensão. Já a capacitância é usualmente muito pequena, da ordem de nanoFaradays para transformadores de distribuição e alguns poucos picoFaradays para reatores com núcleo a ar (SLUIS, 2001).

Figura 11 – Equivalente monofásico de um circuito com carga indutiva



Fonte: Sluis (2001).

Disjuntores são parametrizados para serem capazes de eliminar elevadas correntes de curto-circuito em poucos milissegundos, logo estima-se que para pequenas correntes indutivas, o disjuntor seja capaz de interrompê-las de maneira muito rápida. Isso faz com que o distanciamento entre os contatos do disjuntor, ao extinguir o arco, seja muito pequena, o que pode fazer com que haja uma maior probabilidade a reignições de arco (SLUIS, 2001).

Quando um transformador a vazio é desligado através de um disjuntor a energia magnética armazenada na indutância equivalente do dispositivo é liberada, na forma de energia elétrica, para o capacitor e esse também libera energia armazenada num igual montante (FILHO, 2013).

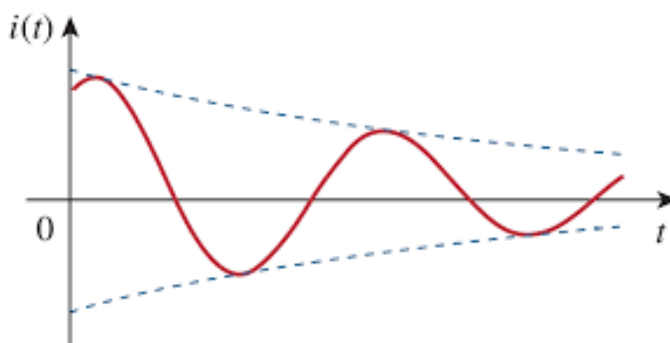
Assim que ocorre a abertura do disjuntor, a carga capacitiva é carregada por uma tensão dada por:

$$v_c = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (2)$$

Isso se dá devido ao fato de que um indutor, por característica intrínseca, se opõe às variações muito bruscas de corrente. Então para evitá-las, o indutor gera uma força eletromotriz que se opõe à variação de corrente inicialmente descrita e assim o capacitor é carregado.

A partir do momento em que o disjuntor eliminou o arco elétrico, o que resta para a carga é um equivalente de circuito LC sem fonte, ou seja, com sua resposta natural, como pode ser visto na Figura 12. Vale a pena salientar que, naturalmente, o transformador possui perdas ôhmicas associadas ao seu funcionamento, podendo ser modeladas através de um resistor, que nesse fenômeno transitório teria a função de amortecer a oscilação de energia entre o capacitor e indutor, contudo para a análise das sobretensões transitórios esse pode ser desconsiderado.

Figura 12 - Resposta natural de um circuito RLC



Fonte: O Autor (2022)

Após a interrupção da corrente, o capacitor descarrega através do indutor com uma corrente oscilando numa frequência que depende dos valores da indutância e capacitância e, portanto, é maior que a da rede industrial (SLUIS, 2001). Essa frequência é obtida através do seguinte cálculo:

$$v_c + v_l = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{C} \int i(t) \cdot dt + L \frac{di}{dt} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{1}{C} \cdot i(t) + \frac{L}{dt^2} \frac{d^2 i}{dt^2} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{1}{LC} \cdot i(t) = 0 \quad (6)$$

Como se trata de uma EDO de 2ª ordem homogênea e com coeficientes constantes, uma possível solução para a corrente seria a que garantisse comportamentos similares tanto para a função $i(t)$ como sua segunda derivada, logo uma boa estimativa seria considerar a corrente como sendo regida por uma função exponencial, tal que segue:

$$i(t) = k \cdot e^{s \cdot t} \quad (7)$$

Onde “k” representa uma constante de proporcionalidade que faz referência à amplitude da corrente a ser analisada e “s” representa a frequência natural em que o circuito oscila.

Adequando isso à equação 5, é possível chegar ao seguinte resultado:

$$s^2 k e^{st} + \frac{1}{LC} \cdot k \cdot e^{st} = 0 \quad (8)$$

$$s^2 k e^{st} + \frac{1}{LC} \cdot k \cdot e^{st} = 0 \quad (9)$$

$$k \cdot e^{st} \cdot \left(s^2 + \frac{1}{LC} \right) = 0 \quad (10)$$

$$s^2 + \frac{1}{LC} = 0 \Rightarrow s = \pm \sqrt{-\frac{1}{LC}} \Rightarrow s = \pm j \sqrt{\frac{1}{LC}} \because \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \Rightarrow s = \pm j \omega_0 \quad (11)$$

$$i(t) = k_1 \cdot e^{j\omega_0 t} + k_2 \cdot e^{-j\omega_0 t} \quad (12)$$

$$i(t) = k_1 \cos(\omega_0 t) + j k_1 \sin(\omega_0 t) + k_2 \cos(\omega_0 t) - j k_2 \sin(\omega_0 t) \quad (13)$$

$$i(t) = (k_1 + k_2) \cos(\omega_0 t) + j(k_1 - k_2) \sin(\omega_0 t) \quad (14)$$

$$i(t) = A_1 \cos(\omega_0 t) + A_2 \sin(\omega_0 t) \quad (15)$$

A descarga do capacitor sob o indutor, nessa frequência, faz com que haja uma grande variação de tensão na carga e, como consequência, a diferença de potencial sob os contatos do disjuntor se eleva, fazendo com que haja uma transferência de energia da fonte para a carga através do canal gerado pelo arco (SLUIS, 2001).

Com isso o capacitor se carrega novamente, com uma tensão mais elevada, já que dessa vez está sob uma frequência oscilatória bem mais elevada, pois a indutância da fonte é muito menos influente que a da carga. Com a repetição do processo de extinção do arco e o capacitor novamente carregado, o processo se repete (GREENWOOD, 2001).

A depender do nível de rigidez dielétrica a que os contatos do disjuntor estão submetidos, o arco pode reaparecer algumas vezes, fazendo com que subtensões elevadas surjam no sistema, prejudicando o transformador, o próprio disjuntor e equipamentos vizinhos (SLUIS, 2001).

2.5 Transitórios no fechamento de transformadores

A causa principal de grandes transitórios no sistema elétrico durante a energização de transformadores se dá pelo surgimento da corrente de *inrush*.

Ao se energizar um transformador de potência, inicialmente sem carga, uma corrente de excitação, responsável pela magnetização do núcleo, é drenada da fonte. Pelo caráter não linear do material ferromagnético componente do núcleo do equipamento, tal corrente tem um formato caracterizado por uma terceira harmônica bem evidente, compondo 40% da resposta (UMANS, 2014).

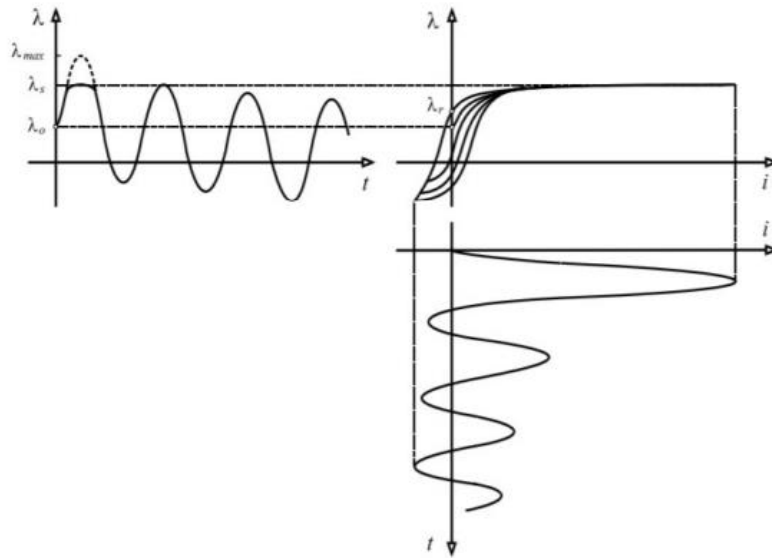
Pela lei de *Faraday-Lenz* é possível observar que, caso a tensão aplicada ao enrolamento primário seja senoidal, o fluxo também há de ser, contudo, defasado em 90° (CHAPMAN, 2013).

Ao se ter um transformador energizado, a corrente de magnetização, associada à intensidade de campo magnético, se relaciona com o fluxo gerado como se demonstra através do laço de histerese, que pode ser visualizado na Figura 6. Nela se observa que, em um material ferromagnético, mesmo quando a corrente é cessada,

parte dos domínios magnéticos permanece alinhada, mantendo uma indução remanente (SLUIS, 2001).

A interação do fluxo residual com o fluxo imposto pela fonte de tensão pode atuar tanto no sentido de atenuar, quanto de agravar a corrente de *inrush*. No caso da Figura 13, o fluxo residual é representado pelo ponto λ_0 e, nesse caso, tem mesmo sinal da variação do fluxo imposta pela fonte externa no momento da energização. Isso faz com que o núcleo seja levado à saturação e, nesse estado, a magnetização se torna pouco eficiente, pois grandes valores de corrente são solicitados para uma magnetização irrisória. (REED e BICKFORD, 1980).

Figura 13 - Influência do fluxo remanente na corrente de inrush



Fonte: Guerra (2018).

Fazendo uma simplificação do modelo de transformador mostrado na Figura 8 para um circuito RL e desconsiderando a saturação (UMANS, 2014) é possível obter que a resposta transitória do fluxo de enlace é dada por:

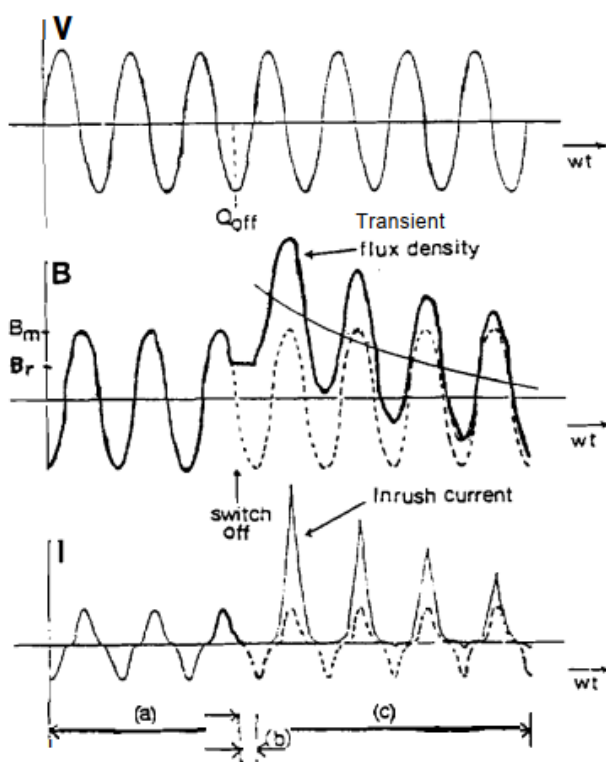
$$\lambda(t) = \frac{U_m}{\omega} * [e^{-R/\omega L_m} - \cos(\omega t)] \quad (16)$$

Na Figura 14 é possível observar que o fluxo transitório pós energização no núcleo possui uma resposta que pode ser analisada como sendo próxima de uma resposta sub-amortecida, submetida a um decaimento exponencial (GUERRA, 2018).

Um aumento considerável do fluxo no núcleo do transformador faz com que esse entre na região de saturação, exigindo correntes transitórias elevadas que podem chegar a até 25 vezes o valor da corrente nominal do equipamento (HARLOW, 2006).

Tal nível de corrente traz grandes prejuízos para o sistema elétrico, pois é equivalente aos valores de correntes de curto-circuito, o que pode levar os sistemas de proteção a atuarem de maneira inadequada, além poder provocar danos estruturais ao transformador (REED e BICKFORD, 1980).

Figura 14 - Tensão de energização, densidade de fluxo e corrente de magnetização em função do tempo



Fonte: Reed e Bickford (1980)

2.6 Mitigação de efeitos transitórios em transformadores

Artifícios como resistores ou reatores de pré-inserção, reatores limitadores de corrente bem como pára-raios foram dispositivos largamente utilizados no processo de redução dos impactos transitórios oriundos de manobras de chaveamento de equipamentos de potência (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Contudo essa metodologia tornou-se bastante dispendiosa, pois exige que os disjuntores a eles associados sejam capazes de incluí-los estruturalmente falando. Além disso, a aplicação desses artifícios pede que os sistemas de proteção sejam capazes de identificar falhas nos resistores de pré-inserção, por exemplo, e ignorá-las em sua atuação (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Com o avanço tecnológico tornou-se possível desenvolver disjuntores de alta tensão com comportamentos cada vez mais previsíveis, sendo caracterizados por possuírem pouco desvio máximo em seus tempos de operação e, associado ao desenvolvimento dos dispositivos eletrônicos, se tornou possível minimizar e até extinguir os efeitos transitórios mencionados em tópicos anteriores através do chaveamento controlado dos polos dos disjuntores (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

A Figura 15 exemplifica uma chave sincronizadora utilizada como acessório de disjuntores de alta tensão.

Figura 15 - Chave Sincronizadora (PSD)



Fonte: SIEMENS (2022)

A estratégia básica que envolve o chaveamento controlado de equipamentos de potência é fazer com que o fechamento e/ou abertura elétrica dos contatos do disjuntor ocorram em instantes ótimos, de maneira a atenuar os transitórios eletromagnéticos que poderiam ser produtos de tais manobras. Para isso, parâmetros ambientais e operacionais do disjuntor são levados em consideração.

2.6.1 Abertura controlada em manobras com transformadores

A abertura de um polo do disjuntor parte do pressuposto que, anteriormente esse está fechado, ou seja, corrente circula pelos contatos do disjuntor. Sendo assim, a estratégia para separação dos contatos deve se dar em relação ao ângulo de fase da corrente (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Para isso o que se faz é pré-determinar o tempo em que o arco elétrico se mantém entre os contatos do disjuntor, de modo a evitar reacendimentos e reignições. Como, do ponto de vista da fonte, o transformador se trata de uma carga quase que puramente indutiva a tensão está adiantada 90° em relação a corrente. Desse modo, iniciar a separação dos contatos num momento próximo do zero da corrente, faz com que uma elevada tensão se dê sob os contatos do disjuntor num momento em que eles estão minimamente separados (com baixos níveis de rigidez dielétrica) e esse contexto é capaz de provocar sobretensões no sistema elétrico, como produto de reignições e reacendimentos (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

O controle do chaveamento tem como princípio prover um maior tempo de arco nos contatos do disjuntor, de modo a fazer com que a extinção do mesmo se dê num momento em que os contatos estejam suficientemente separados, permitindo uma maior rigidez dielétrica, garantindo uma maior condição a oposição às tensões de reestabelecimento (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Diante desse contexto da problemática e sua solução, a chave sincronizadora precisa passar por um processo de parametrização que deve levar em consideração algumas grandezas a serem explicitadas a seguir:

- O tempo de abertura, t'_{abert} , compreende o intervalo entre a aplicação de um degrau de tensão à bobina de abertura do polo até o momento em que ocorre

a separação mecânica dos contatos. Para evitar qualquer tipo de interferência, esse dado é ensaiado com o disjuntor desconectado do sistema e a medição finaliza quando a resistência entre os contatos vai ao infinito (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Fatores ambientais e históricos do equipamento devem ser levados em consideração na parametrização da chave sincronizadora como uma forma gerar uma compensação para possíveis desvios e promover uma previsibilidade comportamental mais assertiva (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Variações de temperatura ambiente, Δt_{temp} , a que o disjuntor está submetido, de tensão de alimentação das bobinas de fechamento, $\Delta t_{tensão}$, bem como de carregamento do sistema de acionamento do disjuntor, Δt_{carreg} , são ensaiadas de modo a gerar tabelas. Essas tabelas podem ser diretamente carregadas ou utilizadas para gerar curvas comportamentais que serão implementadas no algoritmo da chave sincronizadora. (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017)

Desse modo, o tempo de abertura do disjuntor, já devidamente compensado por esses fatores, é dado como se segue:

$$t'_{abert} = t_{ensaiado} + \Delta t_{temp} + \Delta t_{tensão} + \Delta t_{carreg} \quad (17)$$

Em seguida, devem também ser levados em consideração os fatores históricos do equipamento capazes de provocar desvios temporais no comportamento do disjuntor que são: o tempo de inatividade entre duas operações de fechamento e a realização de manobras de fechamento consecutivas (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

O desvio por inatividade entre operações de fechamento é tido como uma função dependente desse tempo, dada pelo Equação 18.

$$\Delta t_{inativ} = f(t_{inativ}) \quad (18)$$

A variação no tempo de manobra de abertura, Δt_{seq} , é dado pela Equação 19, onde para cada n -ésima operação de fechamento é realizada uma subtração entre os tempos de operação medidos e calculados e tal subtração é ponderada pelo fator $w(n)$, de modo a estimar o desvio da próxima operação.

$$\Delta t_{seq} = \sum_{n=1}^N w(n) [t_{abert_med} - t_{abertura}] \quad (19)$$

Com isso a Equação 17 pode ajustada com o intuito de contemplar todas as fontes de desvio possíveis, como se mostra na Equação 20, onde o tempo de atraso, Δt_{delay} , é utilizado no caso do chaveamento controlado de transformadores trifásicos.

$$t_{abert} = t'_{abert} + \Delta t_{inativ} + \Delta t_{seq} + \Delta t_{delay} \quad (20)$$

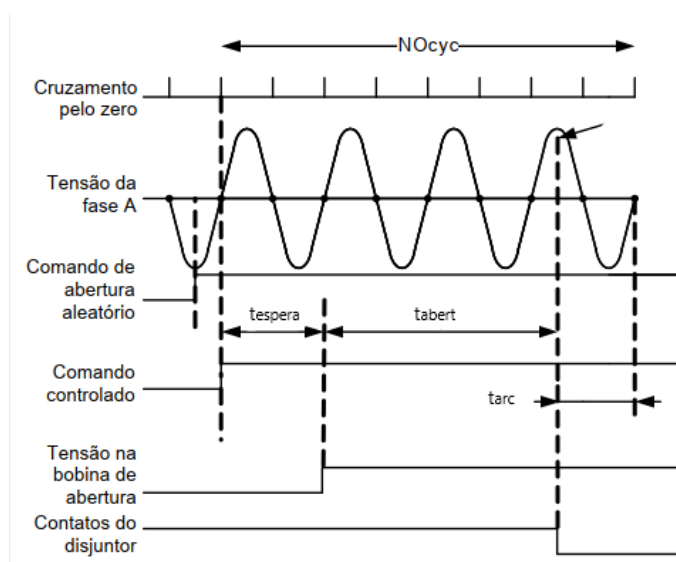
Conhecidos os tempos de abertura e de manutenção do arco até conclusão da manobra de abertura é possível fazer com que o algoritmo calcule quantos ciclos da forma de onda da tensão são necessários para finalizar a execução da abertura. O algoritmo arredonda essa operação sempre para o maior inteiro acima do calculado pela Equação 21. Tal aproximação gera uma variável interna à operação conhecida como tempo de espera, que faz referência ao intervalo de tempo que se transcorre entre o degrau de comando controlado e o início da manobra (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

$$n_{ciclos} = t_{abert} + t_{arco} + t_{espera} \quad (21)$$

Na Figura 16 é possível observar que, com o número de ciclos previamente calculado, um comando de abertura deliberado e aleatório é dado. A chave

sincronizadora retém essa informação e processa sua lógica interna de abertura a partir do momento em que a forma de onda passa pelo ponto de referência, nesse caso o zero da tensão (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Figura 16 - Princípios de temporização de abertura monopolar



Fonte: Gabriel Benmouyal.et al (2017).

Passada a referência e o tempo de espera, um degrau é aplicado às bobinas de abertura dos polos do disjuntor e se inicia o processo de abertura mecânica dos contatos até a extinção do arco num ponto distante ao próximo zero posterior à separação mecânica (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Para uma abertura tripolar o princípio é o mesmo da abertura monopolar controlada, onde é possível obter um tempo de espera para cada tensão de fase, utilizando uma delas como referência e deslocando as demais de um e dois terços de ciclo, como se segue (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Considerando uma sequência de fases abc (positiva) é os tempos de espera, neste caso em ciclos, podem ser dados como se segue.

$$t_{espera(a,A)} \quad (22)$$

$$t_{espera(b,B)} = t_{espera(b,A)} - \frac{1}{3}$$

$$t_{espera(c,C)} = t_{espera(c,A)} - \frac{2}{3}$$

2.6.2 Fechamento controlado em manobras com transformadores

O fechamento de polos de um disjuntor parte do pressuposto de que não há corrente circulando entre os contatos do equipamento. Logo, a estratégia de fechamento controlado desse dispositivo consiste em premeditar o instante de condução de corrente por ele, em referência à tensão entre seus terminais (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Para que a chave sincronizadora seja capaz de processar uma lógica interna que permita tal funcionalidade é necessário que o disjuntor como característica a previsibilidade comportamental. Tal condição pode ser exemplificada por um tempo de abertura com pequena dispersão estatística, sendo esse, o intervalo de tempo que compreende a aplicação de um degrau de tensão nas bobinas de fechamento até o momento em que há o fechamento mecânico dos contatos (HERIVELTO DE SOUZA BRONZEADO ET AL, 2004).

Do ponto de vista dos ensaios, para evitar qualquer tipo de influência do sistema, o disjuntor é manobrado de maneira isolada da rede a que está conectado até o momento em que sua resistência entre contatos se torna nula (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

O tempo de fechamento dos polos do disjuntor, assim como o de abertura, pode ser afetado por diversos elementos. Temperatura ambiente, nível de tensão de alimentação da bobina de abertura e energia armazenada no mecanismo de atuação do disjuntor são os aspectos ambientais que devem ser levados em consideração para influenciar o desempenho do equipamento. Tais variações dos aspectos são armazenados no algoritmo da chave sincronizadora por tabelas ou curvas aproximadas por segmentos lineares (HERIVELTO DE SOUZA BRONZEADO ET AL, 2004).

Já, do ponto de vista do histórico operacional do disjuntor, os fatores que levam a desvios no tempo de abertura de um polo são: operações de fechamento subsequentes e o tempo de inatividade entre duas operações de fechamento, que podem ser calculadas a partir das Equações 23 e 24.

A Equação 23 expressa que a compensação de tempo produto da inatividade entre uma manobra e outra é uma função do tempo de inatividade em si (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

$$\Delta t_{inativ} = f(t_{inativ}) \quad (23)$$

Segundo a Equação 24, para um total de N operações de fechamento, a diferença entre o tempo de fechamento medido e o tempo de fechamento calculado é executada para cada operação. Esta diferença é multiplicada por um fator de ponderação $w(n)$ para cada operação, onde a soma de todos os N fatores de ponderação $w(n)$ é igual a 1. O resultado da soma na Equação 23 indica a tendência no desvio do tempo de fechamento nominal. Torna-se notório que a implementação da compensação fornecida pela Equação 23 necessita que a medição precisa do tempo se dê em tempo real (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017)

$$\Delta t_{seq} = \sum_{n=1}^N w(n) [t_{fech_med} - t_{fech}] \quad (24)$$

Um outro fator de extrema relevância é a taxa de decaimento da rigidez dielétrica dos contatos de disjuntor. Com a aproximação gradual dos contatos do disjuntor, ocorre uma diminuição da rigidez dielétrica, afinal a camada de material isolante entre eles também reduz gradualmente, levando ao aparecimento de um arco elétrico. Desse modo, pode-se concluir que a taxa de decaimento da rigidez dielétrica é uma indicadora de quanto tempo de arco, t_{arc} , haverá entre os contatos do disjuntor, compreendendo o momento de fechamento elétrico até o fechamento mecânico dos contatos (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

De posse dos tempos de fechamento, do ângulo de fechamento ajustado e do tempo de arco, o algoritmo da chave sincronizadora é capaz de definir o número de ciclos que serão necessários para concluir uma operação de fechamento, como é possível de se visualizar na Equação 24 (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

$$n_{ciclos} = t_{fech} - (t_{arco} + t_{espera}) + 1 \quad (25)$$

O número de ciclos calculado a partir da Equação 25 deve sempre ser aproximado do maior número natural imediatamente acima do n_{ciclos} calculado. Tendo isso calculado, ao se comandar uma manobra de fechamento sincronizada de um disjuntor, um tempo de processamento da lógica é gasto até um ponto de referência (HERIVELTO DE SOUZA BRONZEADO ET AL, 2004).

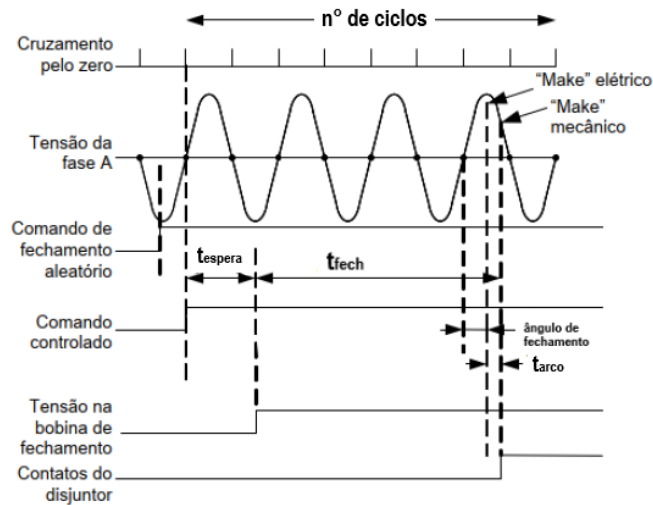
$$n_{ciclos} = t_{fech} - (t_{arco} + t_{espera}) + 1 - t_{delay} \quad (26)$$

Na Figura 17 é possível observar que após o ponto de referência e processamento da lógica, é dado o comando de fechamento sincronizado, de fato, e há um retardo desse momento até o degrau de tensão nas bobinas de fechamento, que é dado pelo tempo de espera, já pré-determinado em lógica (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

Desse momento em diante, a manobra de fechamento inicia e os contatos fixo e móvel do disjuntor se aproximam até que ocorre o fechamento elétrico dos contatos, caracterizado pelo aparecimento do arco elétrico, até que os contatos se fecham mecanicamente (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Os mesmos princípios de atuação utilizados nas manobras monopolares são aplicáveis às manobras tripolares.

Figura 17 - Princípio da temporização do fechamento monopolar controlado



Fonte: Adolpho Calazans et al (2014).

Uma única fase apenas pode ser utilizada como referência de tempo para todas as outras, levando em consideração as defasagens existentes para compensar os cálculos de tempo, como pôde ser visto na Equação 27 onde os tempos estão representados em ciclos, de maneira a garantir que eles estejam independentes do valor da frequência (GABRIEL BENMOUYAL ET AL, 2017).

$$t_{espera(a,A)} \quad (27)$$

$$t_{espera(b,B)} = t_{espera(b,A)} - \frac{1}{3}$$

$$t_{espera(c,C)} = t_{espera(c,A)} - \frac{2}{3}$$

A lógica de fechamento controlado se baseia em calcular o tempo, a partir da Equação 25 e, de posse de tal variável, é possível usar a Equação 26 para obter os tempos de espera de cada fase. Há de se observar que o ponto de referência não necessariamente é uma passagem pelo zero da forma de onda da tensão (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

O fechamento sincronizado de transformadores de potência deve, idealmente, seguir a estratégia exposta anteriormente para que o fechamento elétrico dos contatos do disjuntor ocorra num ângulo de fase da tensão que corresponda a um fluxo presumível igual ao fluxo remanescente no núcleo ferromagnético do equipamento (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Em princípio, a base da decisão do momento ideal de fechamento é a aferição do fluxo residual presente no equipamento, contudo a medição direta dessa grandeza é extremamente complexa, de modo que sua medição é realizada de maneira indireta a partir de uma integração numérica da tensão, tendo início entre um e dois ciclos antes da abertura do disjuntor (GUERRA, 2018).

A Equação 28 mostra como é feita a integração numérica a partir do método trapezoidal, onde é realizado um somatório, executado numa dada frequência de amostragem, que começa em $n=1$ como um ponto um ou dois ciclos anteriores a abertura do disjuntor e $n=N-1$ faz referência a algumas amostras de tensão logo após a tensão ter ido a zero (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

$$\Phi_{residual} = \sum_{n=1}^{n=N-1} \left(\frac{v_n + v_{n+1}}{2} \right) \left(\frac{1}{f_{amostragem}} \right) \quad (28)$$

2.6.3 Fechamento controlado em transformadores tripolares

Os transformadores trifásicos, associados a aplicações práticas, têm por característica ter núcleos dependentes, ou seja, o fluxo em um dos três enrolamentos depende da tensão nos outros (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Ao se energizar uma das fases do transformador, o fluxo residual associado aos outros dois núcleos ou pernas de núcleo ferromagnéticos deixa de ter um fluxo residual estático e passa a ter um fluxo residual dinâmico, devido à interdependência entre os núcleos já previamente mencionada (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001).

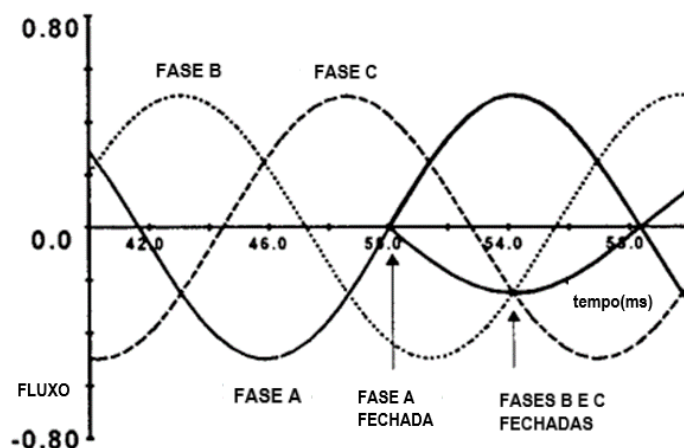
Para transformadores trifásicos com núcleos dependentes sem fluxo residual, o fechamento da primeira fase ocorre no pico de tensão da fase correspondente, já

que nesse momento o fluxo presumível é nulo e não há risco de saturação. A alimentação de uma das fases gera, por indução, tensões com metade da amplitude e defasadas em 180° em relação à fase energizada (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001).

A Figura 18 mostra que o ponto ideal de energização das duas fases restantes (B e C), nesse caso, ocorre num intervalo de tempo de um quarto de ciclo após o fechamento da primeira fase (A), onde os fluxos presumíveis e residuais têm os mesmos valores. Além disso, é possível observar que a soma dos fluxos em configurações de núcleos dependentes é nula (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001).

Por demonstrações obtidas em testes de campo e na literatura é observado que o comportamento dos fluxos residuais em transformadores trifásicos deve, inerentemente, somar zero. Onde, costumeiramente, uma das fases tem fluxo próximo do zero, enquanto as outras duas possuem fluxos finitos, valores próximos com polaridades distintas (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001)

Figura 18 - Energização de um transformador trifásico sem fluxo residual



Fonte: Brunke e Fröhlich (2001).

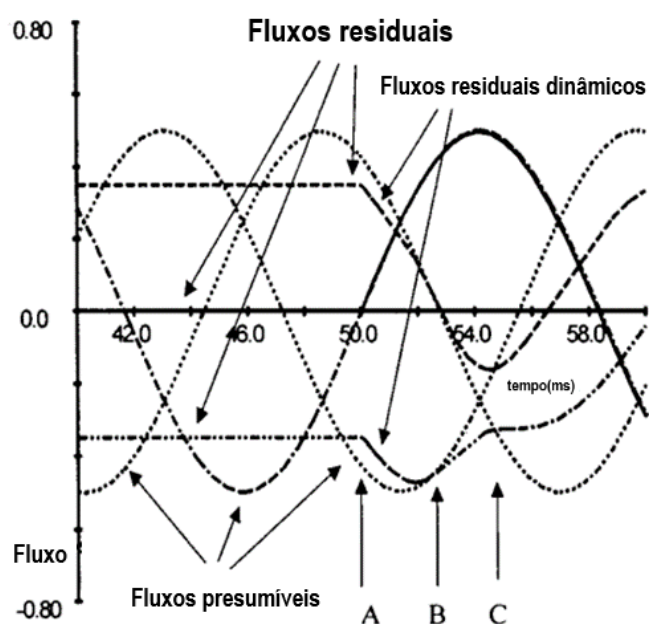
Energizando umas das fases, os fluxos residuais transitórios nas duas fases restantes se iniciam em pontos dos seus respectivos laços de histerese. Em virtude da não linearidade do núcleo, essa diferenciação faz com que os enrolamentos apresentem indutâncias transitórias distintas, de modo que os fluxos dinâmicos e tensões não são igualmente divididos. Os núcleos mais distantes da saturação têm

tensões mais elevadas aplicadas a eles e isso faz com que, tendo continuidade no processo, os fluxos residuais tendam a se equalizar (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001).

A Figura 19 mostra que um fechamento da fase A induz fluxos dinâmicos nas fases B e C. Como a fase A foi energizada sem levar o núcleo à saturação, torna-se plausível concordar que os fluxos presumíveis e o da fase em si podem ser tratados como iguais em todos os instantes de análise. Como os fluxos presumíveis e dos núcleos em si devem, ao serem somados, resultar em um fluxo resultante nulo é possível afirmar que, durante um ciclo, ambos terão dois momentos em que serão idênticos. E tais momentos (B e C) são considerados como momentos ótimos para manobra das fases que ainda permanecem abertas (BRUNKE e FRÖHLICH, 2001).

Para a configuração de transformador em estrela aterrada, como há um caminho de retorno para a corrente é possível fechar uma única fase e obter uma tensão de fase como referência. Contudo para transformadores em delta ou estrela não aterrada, como ao fechar apenas uma fase não haverá caminho para retorno de corrente, o que deve ser feito é utilizar uma tensão de fase como referência e aplicar compensações para funcionamento do sincronizador (ADOLPHO CALAZANS ET AL, 2014).

Figura 19 - Fluxos residual e presumível de um transformador trifásico

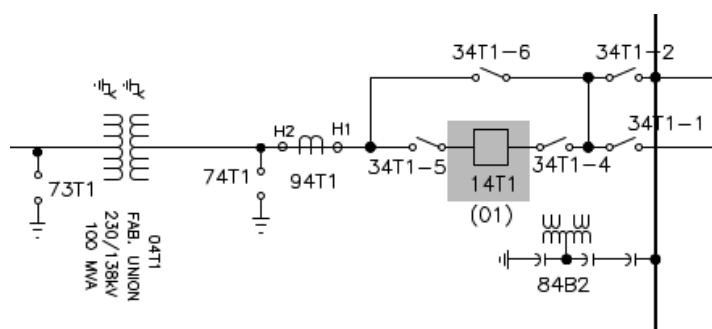


Fonte: Brunke e Fröhlich (2001).

3 CONTEXTO DO ESTUDO DE CASO

O caso a ser estudado consiste num projeto de *retrofit*, realizado pela INTEREST Engenharia no período entre 2021 e 2022, de uma subestação da rede básica situada no estado da Bahia, onde houve a troca de um disjuntor de 230kV. Tal disjuntor se trata de um equipamento de manobra em um vão de transformador, com código operacional 14T1, que pode ser visto no diagrama unifilar representado na Figura 20.

Figura 20 - Diagrama Unifilar - Vão 04T1



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Na Figura 20 é possível observar que a subestação em estudo, no setor de 230kV, possui um arranjo definido como barra dupla 5 chaves, que permite, em caso de contingências, que qualquer vão seja transferido, através de um disjuntor com tal funcionalidade, utilizando uma barra de transferência. Especificamente esse arranjo permite que qualquer uma das barras possa ser usada como barra principal ou de transferência, embora operacionalmente as barras tenham sua funcionalidade fixada.

A troca do disjuntor na subestação em estudo contempla a modernização do controle, sinalização e comando. No que tange ao aspecto relacionado ao comando, por se tratar de um vão de transformador, o novo disjuntor está associado a um sincronizador devidamente habilitado para atuar tanto em manobras de abertura como de fechamento a depender da operação da subestação.

3.1 Solução encontrada para a subestação

Subestações da rede básica possuem uma estratificação de níveis possíveis de comando, sinalização e supervisão de equipamentos. Para o caso de uma intervenção, nesse sentido, realizada diretamente no armário do equipamento, localizado do pátio, como há um menor de nível de automação do processo, diz que esse é o nível 0.

Já para uma condição em que o operador, situado na casa de comando da subestação, têm a opção de promover comandos, observar status dos equipamentos e receber sinalizações através de um painel, o nível de automação é conhecido como nível 1. Um nível acima, o nível 2, é obtido quando tais funcionalidades podem ser obtidas através do emprego de um sistema supervisorio. Para subestações da rede básica, em sua maioria, esse é o SAGE, que se trata de um Sistema Aberto de Gerenciamento de Energia.

Para que o disjuntor consiga enviar suas informações para o sistema supervisorio e para que os comandos dados em nível 2 sejam capazes de sensibilizar o equipamento é necessário que exista uma UTR, Unidade Terminal Remota ou uma Unidade de Controle.

Uma UTR se trata de um dispositivo utilizado para controle e monitoramento remoto de vários dispositivos, contudo os comandos e tomadas de decisões a partir de uma sinalização ou alarme não são feitos de maneira automatizada, pois a UTR não conta com um algoritmo interno capaz de processar uma lógica e tomar uma decisão. Enquanto uma Unidade de Controle é definida como um dispositivo eletrônico inteligente capaz de, em seu algoritmo interno, aglutinar uma infinidade de funções, entre elas comando, controle e sinalização de maneira independente.

Para a subestação em estudo, como as UTRs já existentes possuíam entradas suficientes para receber a sinalização dos equipamentos a serem substituídos, sua utilização foi mantida, inclusive para funções de comando. De modo que o fato novo associado ao comando do novo disjuntor passa pela utilização de um painel sincronizador.

Figura 21- Vista Geral da Mesa de Operação do SAGE



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2021).

3.2 Entradas analógicas para sincronização

O sincronizador utilizado na intervenção em análise é também capaz de, ao obter sinais de tensão e corrente em tempo real, gerar registros oscilográficos que serão importantes auxiliando em análises de ocorrências, distúrbios e perturbações no sistema elétrico.

Para que isso ocorra, o sincronizador deve receber sinais equivalentes de tensão e corrente do vão, oriundos de transformadores de medição, respectivamente TPs e TCs. No projeto existente os sinais de tensão e corrente já eram dispostos para um multimedidor, de modo a fazer com que se torne viável derivá-los para o sincronizador.

Figura 22-Multimedidor Trifásico



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

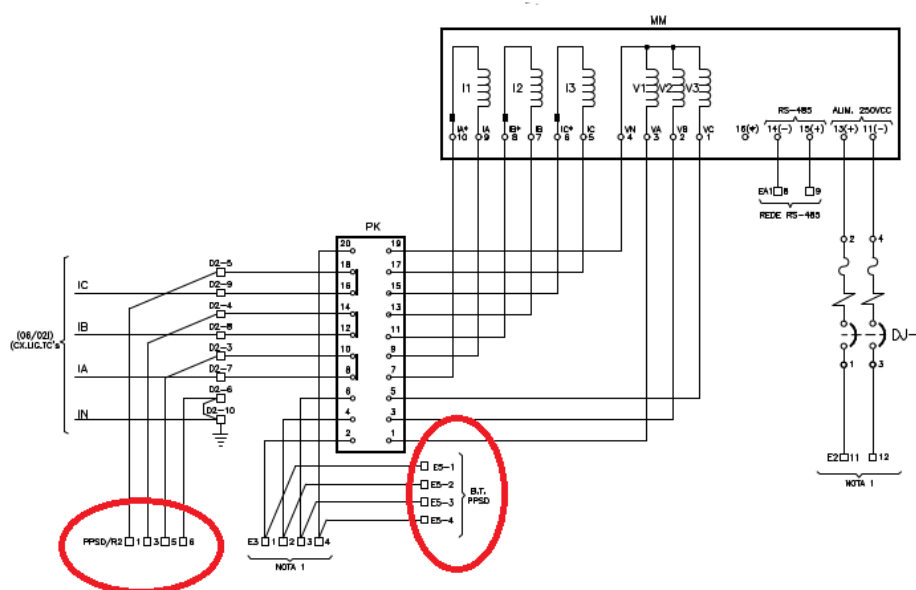
Esse equipamento é utilizado para exposição de valores de grandezas elétricas como tensão e corrente. Na Figura 22 é mostrado o multimetror instalado no painel de comando do vão 04T1, onde são disponibilizadas as tensões de fase.

A partir da Figura 23 e da Figura 24 é possível observar que a derivação do sinal de tensão exige apenas uma conexão em paralelo entre os medidores de ambos equipamentos, enquanto para a corrente há a necessidade de abrir o fechamento da conexão em estrela, feita anteriormente no bloco de teste PK, para que os medidores sejam conectados em série e com isso o fechamento da ligação em estrela é realizado do bloco de teste BT1, mostrado na Figura 24.

Os blocos de teste BT1 e BT2 são chaves que são capazes de fazer com que os transformadores de medição nunca sejam expostos a condições operacionais danosas aos mesmos.

Para os transformadores de corrente, o secundário nunca pode ser aberto, pois tal condição leva o núcleo do TC à saturação e, em consequência, a danos irreversíveis. Já para os transformadores de potencial, O BT2 desconecta uma das cargas em paralelo para evitar que o secundário do TP seja posto em curto

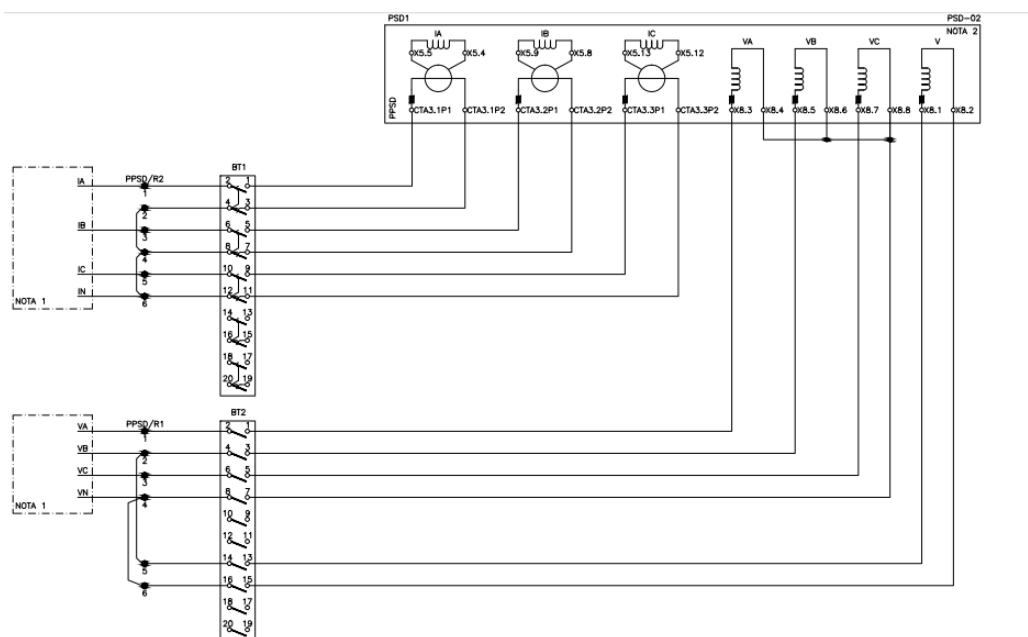
Figura 23 - Derivação dos sinais de corrente e tensão para o sincronizador



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

De praxe, a tensão tomada como referência para os cálculos internos, que apoiam a manobra sincronizada, é obtida a partir da fase central da sequência positiva, no caso a fase B, como é demonstrado na Figura 24. Contudo qualquer uma das três fases poderia, sem prejuízo funcional, ser tomada como referência.

Figura 24 - Entradas Analógicas do Sincronizador



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

3.3 Painel do sincronizador

Para que a chave sincronizadora possa executar suas funcionalidades, é necessário que seja fornecido ao painel, em que ela está instalada, um potencial CC. Para subestações da rede básica, o procedimento de rede do ONS obriga que esses empreendimentos possuam capacidade de fornecer potencial contínuo de maneira redundante.

Esse potencial é fornecido por retificadores e, em casos de emergência, por um banco de baterias. Cada dupla dessa é responsável por alimentar uma barra de serviços auxiliares CC, num geral com potenciais de 125 ou 250Vcc, e dessas barras os potenciais são derivados e dispostos em disjuntores alocadas em painéis, como os que podem ser vistos na Figura 25.

Figura 25 - Painéis de Serviços Auxiliares 125Vcc



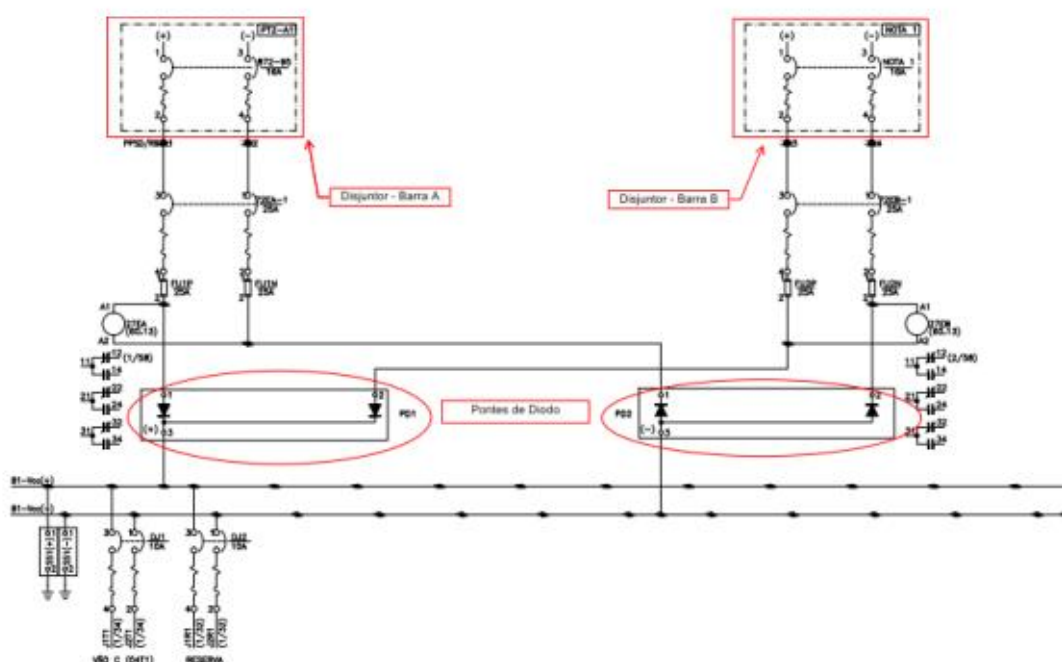
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2021).

Na Figura 26 é possível observar que o potencial a ser fornecido para o painel pode ser disposto por um disjuntor da barra A ou da barra B, de maneira que haja redundância, diminuindo consideravelmente a possibilidade de que o painel e a chave percam sua funcionalidade. Também é possível notar que tais potenciais são supervisionados por relés auxiliares de subtensão, cujos contatos sinalizam falta de tensão em outro painel alocado na mesma subestação.

Pontos de diodos, PD1 e PD2, são utilizadas para evitar o paralelismo entre as fontes. Caso uma barra já esteja sendo utilizada para prover o potencial para o painel, em caso de acionamento do disjuntor da outra barra, os diodos associados a ela jamais estariam diretamente polarizados.

Logo não seria possível conectar seus terminais às barras do painel. Por fim, dois circuitos são derivados daí. Um denominado J1T1/J2T1, correspondentes aos potenciais positivo e negativo exclusivos para a chave sincronizadora do vão 04T1 e mais um J1R1/J2R1 que correspondem a um circuito reserva disponibilizado.

Figura 26 - Distribuição de Polaridades para o Painel



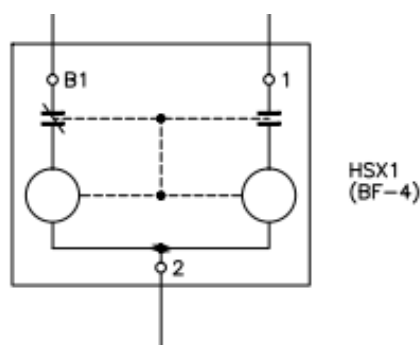
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

3.3.1 Habilitação do sincronizador

A habilitação da chave sincronizadora ocorre através da aplicação de um relé biestável, denominado de HSX1. Um relé biestável é um dispositivo dotado de duas bobinas, uma de operação e outra de rearme.

Quando a bobina de operação é energizada, os contatos auxiliares associados a ele comutam e permanecem comutados até o momento em que a bobina de rearme é energizada.

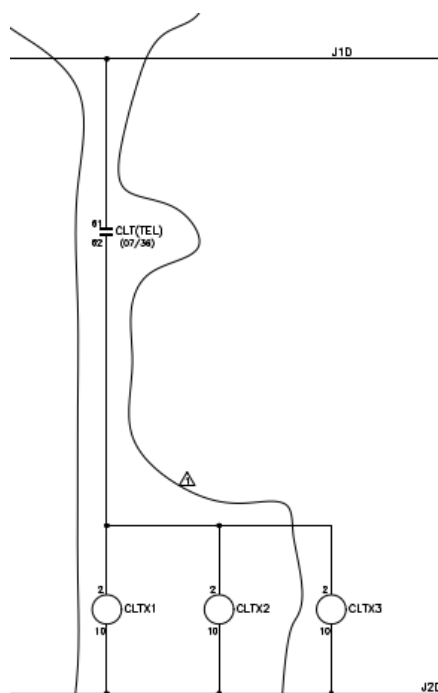
Figura 27 - Relé Biestável



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

O sincronizador pode ser habilitado de duas formas, uma local e outra remota. O acionamento local está associado à ação do operador em se encaminhar até o painel, onde o sincronizador está alocado, e habilitá-lo manuseando uma chave, enquanto o acionamento remoto necessita que o vão, através de seu painel, deve estar habilitado para ser comandado remotamente e isto ocorre através da colocação da chave CLT na posição “telecomando”, como representado na Figura 28.

Figura 28 - Multiplicação de sinal da chave de comando CLT



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

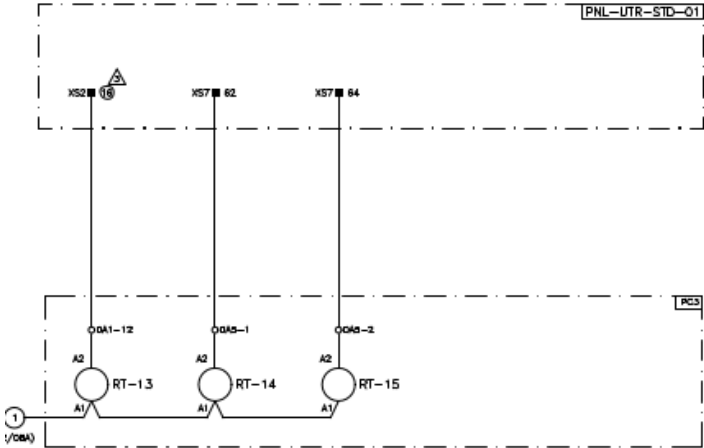
Com isso, através do SAGE, um comando é dado a partir da UTR, esse comando é multiplicado com a utilização de relés auxiliares RT-14, para habilitar, e RT-15, para desabilitar a chave sincronizadora, que pode ser analisado na Figura 29.

É válido salientar que, para que a habilitação do uso da chave sincronizadora seja realizada de maneira consistida, o status da mesma deve ser saudável, ou seja, ela não pode estar sinalizando nenhum tipo de falha interna de sensor, tensão ou falta de parâmetros.

No projeto da subestação em análise a sinalização de falha interna do sincronizador é realizada com a utilização de um relé auxiliar, denominado de dRA-88, como pode ser visto na Figura 30.

Figura 29 – Relés de Telecomando

REARME DO	SINCRONIZADOR 14T1	
RELÉ DE BLOQUEIO	HABILITAR	DESABILITAR



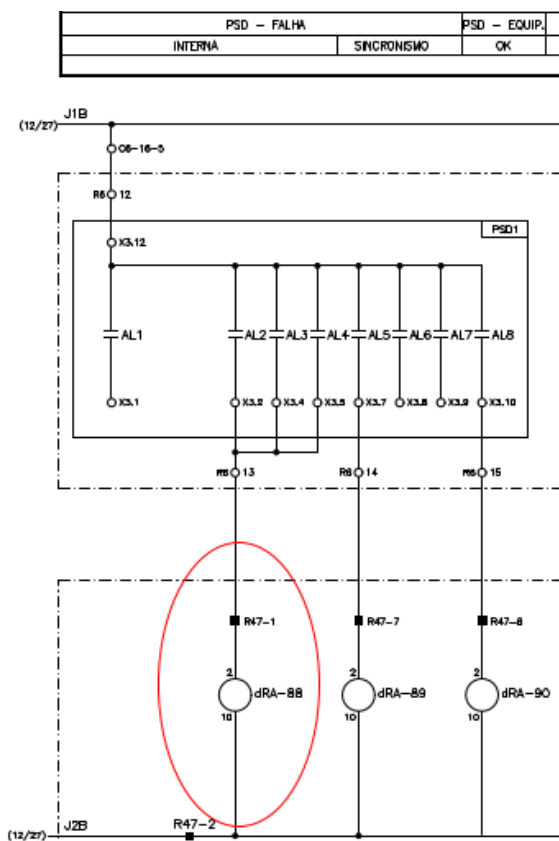
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Desse modo, as lógicas de contatos para habilitar e desabilitar o sincronizador, vistas na

Figura 31, podem ser explicadas de maneira sequenciada. Para habilitar, de maneira local, o operador precisa ir ao painel e rotacionar a chave, denominada por HDS1, isso somado ao fato de que o sincronizador não falhou permite que a bobina de operação do relé HSX1 seja energizada e o equipamento, dessa forma, está devidamente habilitado. De maneira remota, a chave CLT precisa estar na posição “telecomando” e a UTR precisa sensibilizar o relé RT-14.

Já para desabilitar o equipamento, a lógica é similar. Para energizar a bobina de rearme, existem três opções. Caso o operador se dirija ao painel e rotacione a chave HDS1, o equipamento pode ser desabilitado manualmente.

Figura 30 - Sinalização de Falha Interna do Sincronizador

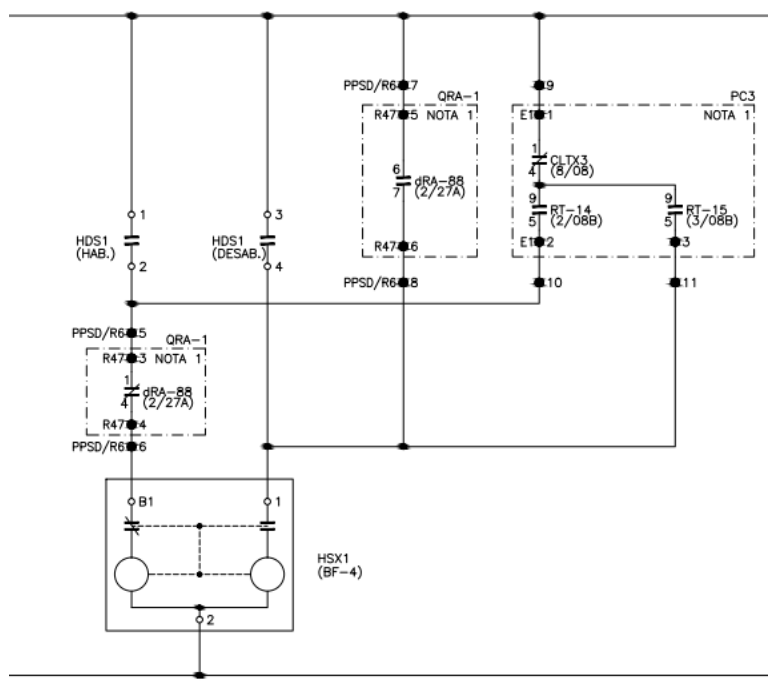


Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Em caso de falha interna do sincronizador, a bobina de rearme do relé HSX1 é energizada automaticamente como uma proteção e, por fim, a última opção é dada através de um comando de desabilitar deliberado, onde por intermédio do SAGE é

possível desabilitar o dispositivo, utilizando a UTR como uma “interface” e o relé multiplicador RT-15 como atuador.

Figura 31 - Lógica para habilitar ou desabilitar o Sincronizador



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Nesse último caso, é válido salientar que o vão necessita estar habilitado para a emissão de comando remotos com a chave de telecomando CLT na posição “telecomando”, vide Figura 31.

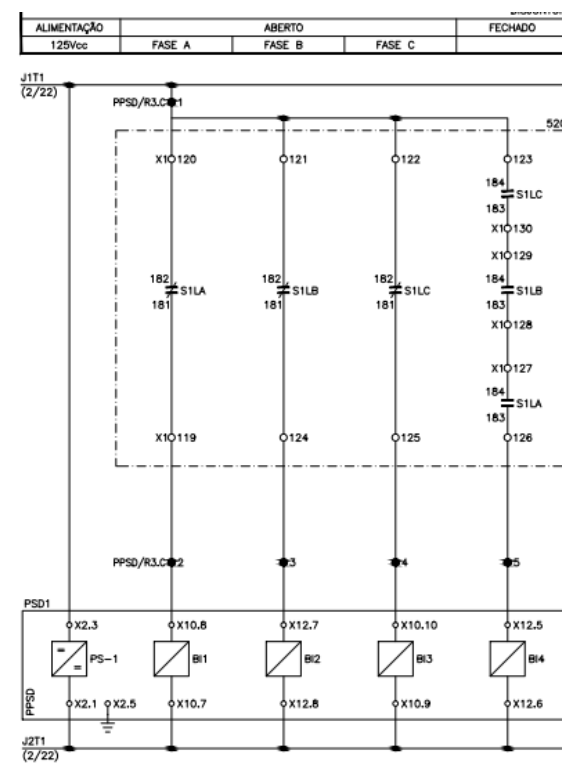
3.3.2 Entradas digitais para sincronismo

As entradas digitais são responsáveis por fazer uma conversão de um sinal, nesse caso de tensão, analógico em uma variável digital. No caso da subestação em análise, um sinal de 0Vcc em uma entrada binária é convertida em nível lógico 0, enquanto 125Vcc se converte em nível lógico 1.

No projeto em estudo, o sincronizador recebe as informações de posição do disjuntor 14T1, através dos contatos auxiliares (S1LA, S1LB e S1LC), para sinalizar o

seu estado. Sendo o comando desse disjuntor monopolar, o status “fechado” só pode ser considerado caso as três fases (S1LA, S1LB e S1LC) estejam fechadas simultaneamente, enquanto para posição “aberto” isso é realizado de maneira independente para cada fase.

Figura 32 - Entradas digitais para sinalização de posição do disjuntor



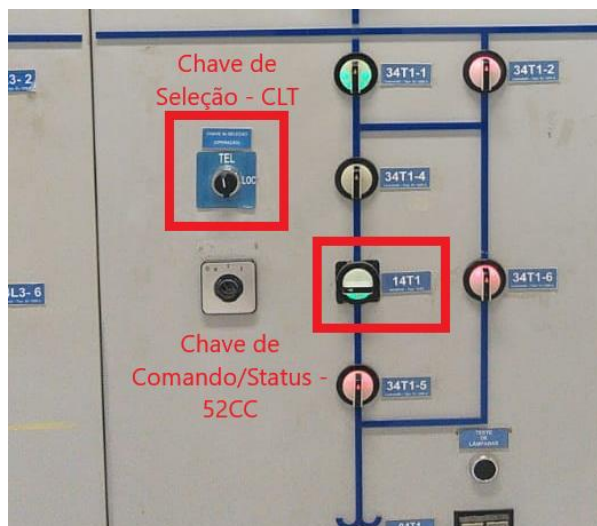
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Existem outras duas entradas digitais responsáveis por processar as lógicas internas de abertura e fechamento, respectivamente, como pode ser visto na Figura 34.

Como já mencionado anteriormente, os comandos de um equipamento podem ser realizados em níveis que dependem do processo de automação atrelado a ele. Tanto para abertura como fechamento, os comandos em nível 1 ou 2, são responsáveis por, em caso de sincronizador habilitado, iniciar o processamento da lógica interna do equipamento, representado na Figura 35. Antes de ocorrer a seleção do modo com que a manobra será executada, em caso de comando de fechamento

ou abertura no modo “local”, é necessário que a chave de seleção CLT, localizada no painel de comando do vão, esteja na posição “local” e que seja dado o comando direto através de uma chave rotativa de comando e status do disjuntor, denominada de 52CC, como pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Painel de Comando do Vão 04T1



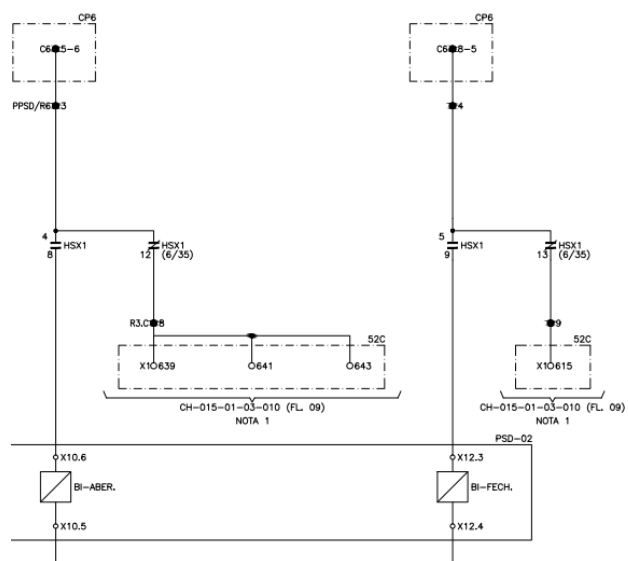
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2021).

Essa chave de comando do disjuntor tem a capacidade de comutar o estado de seus contatos para duas possibilidades de comando, ligar e desligar, e/ou mais duas possibilidades de estado do disjuntor, ligado e desligado.

Caso isso ocorra e nenhuma proteção impeditiva de operação do disjuntor tenha sido ativada, de modo a bloquear uma operação de fechamento, o disjuntor se torna apto a ter uma manobra conduzida.

Já para que o comando de fechamento ou abertura seja realizado de maneira remota, a chave de seleção CLT deve estar na posição “telecomando”, habilitando o equipamento para recebimento de comando via SAGE, com a utilização da UTR associada a relés multiplicadores de informação.

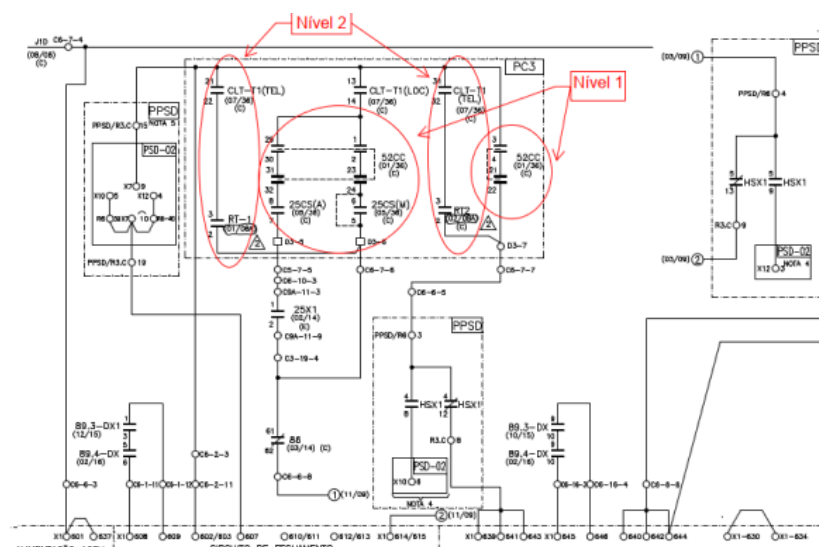
Figura 34 - Entradas digitais para lógicas de abertura e fechamento sincronizado



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Independentemente de que nível o comando tenha sido dado, para o caso em que o equipamento está desabilitado, é realizada a operação de abertura ou fechamento deliberado sem sincronismo algum, enquanto na situação em que o sincronizador está habilitado, as entradas digitais (BI-ABER/BI-FECH) são energizadas e a lógica associada às manobras começa a ser processada.

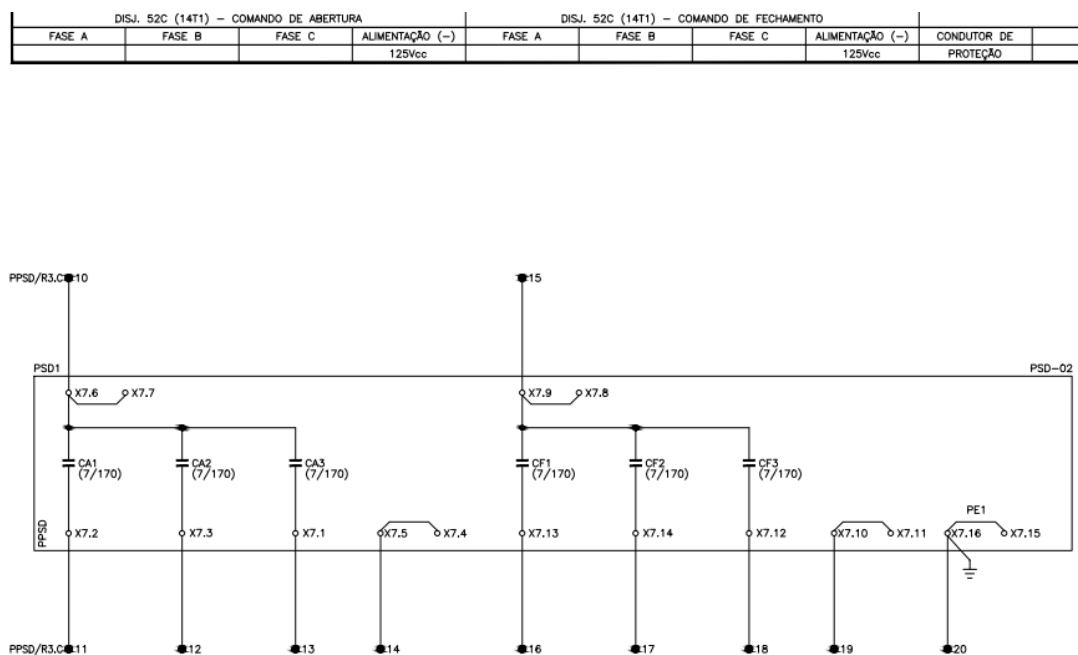
Figura 35 - Comandos em nível 1 e 2 do disjuntor 14T1



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

Passado o tempo de processamento interno da lógica atrelada à manobra sincronizada, as saídas digitais de abertura ou fechamento, representadas na Figura 36, comutam seu estado e então um degrau é aplicado nas bobinas de fechamento ou abertura de cada polo do disjuntor, a depender da manobra a ser executada.

Figura 36 - Saídas digitais para comandos de abertura e fechamento sincronizado



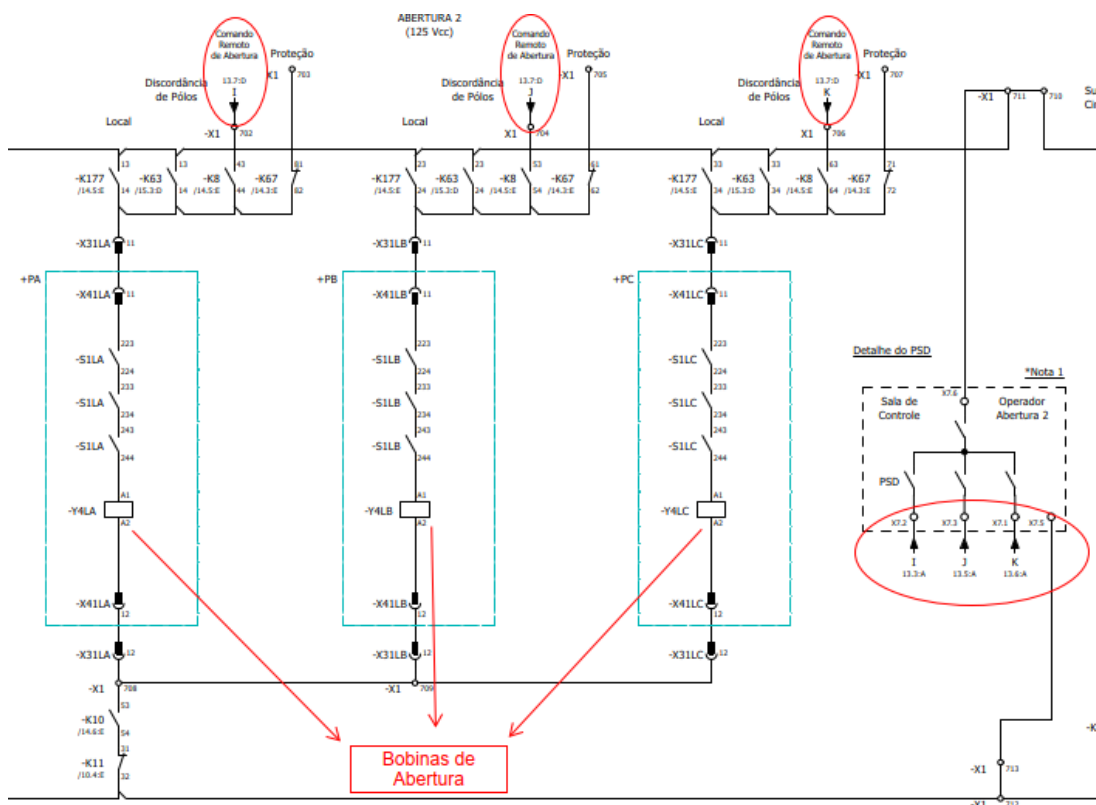
Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

O disjuntor a ser instalado na subestação em análise conta com um circuito de fechamento e dois circuitos de abertura redundantes, seguindo exigências do procedimento de rede do ONS nos aspectos que tangem a necessidade de os sistemas de proteção atuarem da maneira mais consolidada e segura possível. O dispositivo sincronizador, nesse caso em específico, pode atuar tanto no circuito de fechamento, como no 2º circuito de abertura do disjuntor.

A Figura 37 mostra um trecho do esquema interno do disjuntor, referente ao 2º circuito de abertura, que está associado ao sincronizador. Nela é possível observar que as saídas digitais, representadas na Figura 36, ao serem conectadas aos bornes X1-702, X1-704 e X1-706 do disjuntor são capazes de energizar as bobinas do circuito de abertura do equipamento, seguindo a estratégia definida em algoritmo para

transformadores. A atuação no circuito de fechamento se dá com lógicas de contatos sendo realizadas de maneira similar ao representado na Figura 37.

Figura 37 - Trecho do Esquema Interno do Disjuntor



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

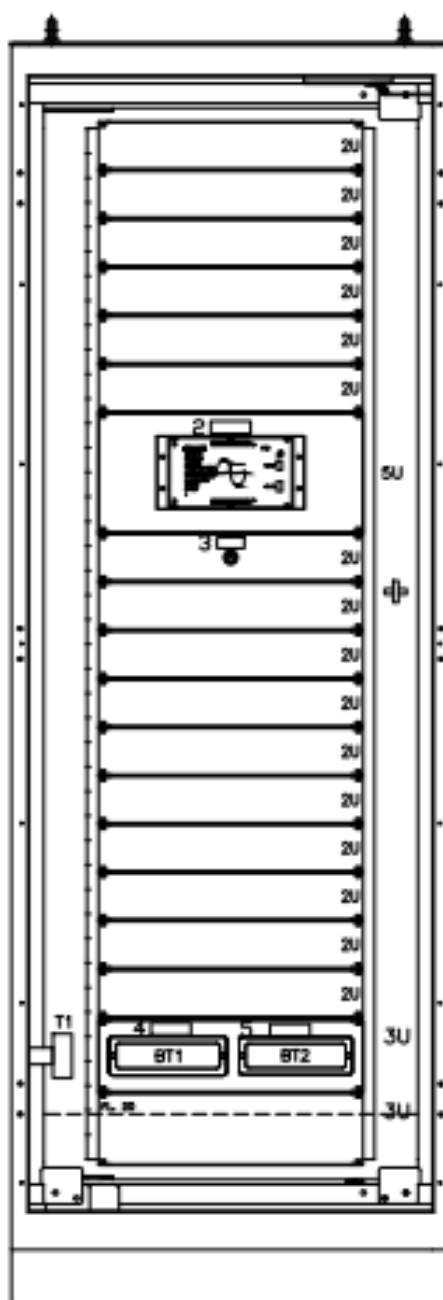
3.4 Projeto construtivo do painel

Para que o sincronizador possa atuar em conjunto com o disjuntor é necessário que o painel onde ele está alocado crie as condições operacionais para tal. Desse modo, para proteção, sinalização, interface entre outras funções, se torna necessário que o painel seja dotado de miscelâneas como mini disjuntores, fusíveis, supressores de surto, relés, bornes e uma vasta gama de materiais.

Para que os arranjos dentro de um mesmo painel sejam realizados de maneira funcional, se torna necessário que os dispositivos sejam conectados seguindo o projeto funcional já anteriormente referenciado.

A Figura 38 mostra os detalhes construtivos frontais do painel onde o sincronizador associado ao disjuntor do vão 04T1 foi instalado. Nela é possível identificar o próprio sincronizador, mais abaixo se percebe a presença da chave rotativa, denominada de HDS1 e na parte de baixo do painel estão os blocos de teste de corrente e tensão.

Figura 38 - Vista Frontal do painel com a porta aberta



Fonte: Adaptado de INTEREST Engenharia LTDA (2022).

3.5 Testes de aceitação

Até então todos os processos já citados fazem parte da etapa de projeto e, portanto, conseguem plenamente ser executados em escritório. De maneira a garantir a integridade do sistema quando o projeto se integrar a ele é necessário que haja sua certificação. Isso ocorre a partir de dois tipos de testes que são realizados: o Teste de Aceitação em Fábrica (TAF) e Teste de Aceitação em Campo (TAC).

No TAF o painel onde a chave sincronizadora está alocada tem seus componentes testados em fábrica a fim de verificar possíveis falhas, inconsistências ou desvios do previsto no projeto original. As incongruências são corrigidas na própria fábrica antes dos equipamentos serem enviados para campo, sendo o TAF o primeiro teste a ser realizado.

Com a realização bem-sucedida do TAF, a estrutura é direcionada para a sua aplicação e instalação em campo, com isso se torna possível iniciar o TAC. O teste de aceitação de campo tem por finalidade ratificar o que foi previsto em projeto, do ponto de vista construtivo e elétrico em si, e garantir que todas as informações e funcionalidades sejam atestadas totalmente, de modo a fazer com que o processo de integração com o sistema operante se dê da maneira mais assertiva possível, reduzindo as possibilidades de interferências, desligamentos entre outras falhas operativas do sistema que poderiam acarretar em diversos prejuízos sistêmicos e financeiros.

3.6 Conforme construído

Após a fase de projeto e do TAC ocorre o momento de execução da obra, incluindo o TAF. Essa fase traz consigo a possibilidade de alterações no projeto devido a uma diversa gama de fatores como: inconsistências de insumos obtidos (para a fase de projetos) junto ao cliente e defasagem entre recebimento de insumos e realização da obra muito grande, o que pode fazer com que o estado atual da subestação tenha sofrido modificações.

Desse modo, após a realização das modificações inerentes à fase de obras o projeto executivo deve ser atualizado para gerar sua versão chamada de “conforme construído” e, então, o referido projeto se dá por concluído.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O desenvolvimento da intervenção projetada e proposta obteve sucesso em sua implementação em campo, visto que poucos pontos necessitaram de ajustes em campo. No decorrer deste trabalho, a partir da apresentação dos processos que compõem o projeto, se torna possível destacar algumas questões de suma importância para a aplicação do mesmo.

O êxito na implementação do projeto de troca do disjuntor, bem na implementação do IED responsável por promover o sincronismo de manobra se dá pelo fato de que o sincronizador pode ser analisado como um equipamento pouco invasivo ao sistema onde está sendo implementado, além de ser uma ferramenta bastante versátil e capaz de suprir as necessidades e exigências operacionais associadas a um transformador de potência, que se trata de um ativo extremamente rentável para os agentes transmissores.

Embora a lógica interna de cálculo para tomada de decisão das manobras sincronizadas seja bastante complexa, do ponto de vista do projeto executivo, associado à fase de obras, as análises e preocupações cercam apenas a necessidade de dispor ao equipamento as informações (tensão, corrente e comando) que são necessárias para sua correta atuação.

O sincronizador, desde que tenha sua atuação habilitada, possui a versatilidade de aceitar o sinal de comando, de maneira quase que independente do nível de automação associado, seja nível 1 ou 2, trazendo assim confiabilidade ao processo.

O sincronizador pode atuar, ainda mais, como um equipamento capaz de executar a oscilografia para registrar as formas de onda associadas às tensões e correntes do vão. Desse modo, aplicações que associam os sincronizadores à sistemas que registram perturbações se tornam possíveis de serem implementadas, o que aumenta a capacidade de gerar insumos para entendimento do sistema elétrico.

Apesar de o projeto ter sido bem-sucedido, como já foi expresso anteriormente, deve-se haver cuidado ao analisar o contexto de outras subestações, pois cada empreendimento possui uma filosofia específica associada ao comando dos equipamentos e medição das grandezas. Logo um projeto desse porte, apesar de ter

a possibilidade de ser usado como base para outros futuros, não deve ser tomado como verdade universal.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

O trabalho aqui apresentado obteve êxito nos objetivos propostos de expor uma aplicação prática de comando sincronizado de manobras de disjuntores da rede básica, em um caso real de subestação 230 kV, de modo que foi possível analisar as necessidades inerentes a aplicação. Para isso, houve a necessidade de desenvolvimento de conhecimentos associados à área de sistemas elétricos de potência, comandos elétricos, instalações elétricas, arranjos de subestações, equipamentos e procedimentos operativos, fazendo com que haja um certo potencial de replicabilidade para diversas outras situações, analisando caso a caso.

A aplicação de dispositivos sincronizadores se torna bastante viável, pois apesar de ser exigido um custo extra pra implementação junto ao disjuntor, a aplicação desse IED torna o sistema mais confiável, já que evita que correntes de *inrush*, da ordem de grandeza de um curto-circuito, façam com que sistemas de proteção atuem de maneira inadequada, indisponibilizando equipamentos importantes ao sistema.

Manobras sincronizadas evitam estresses elétricos e eletromecânicos nos enrolamentos dos transformadores de potência, aumentando a vida útil dos equipamentos, gerando economia para os agentes transmissores que detêm ativos importantes para o sistema elétrico como no caso dos transformadores.

Há uma grande dificuldade de encontrar, na literatura acadêmica, análises da aplicação do chaveamento controlado em cargas indutivas de grande porte, logo essa pode ser considerada uma boa oportunidade para estudos futuros. Além disso, análises podem ser realizadas em relação a aplicação dessa estratégia de chaveamento associado a outros tipos de equipamentos como: bancos de capacitores, reatores e linhas de transmissão, trazendo à luz as vantagens e desvantagens tanto do ponto de vista teórico quanto de aplicação prática.

REFERÊNCIAS

- ADOLPHO CALAZANS ET AL. Benefícios Operacionais da Aplicação de Manobras Controladas de Equipamentos de Alta Tensão. **CIGRÈ A3-06**, p. 2-9, 29 Novembro 2014.
- BICHELS, Arlei. **Sistemas Elétricos de Potência**.
- BRUNKE, John H.; FRÖHLICH, Klaus J. Elimination of Transformer Inrush Currents. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY**, p. 276-280, 2001.
- CABRAL, Sérgio H. L. Análise de Transitórios Elétricos em Transformadores Através do Método LTM, Florianópolis, Maio 2003.
- CAMPOS, Luís F. G. D.; ESTEVAM, Giuliano P. A atuação das subestações no Sistema Elétrico. **Revista eSALENG – Revista eletrônica das Engenharias do UniSALESIANO**, 2020.
- CHAPMAN, Stephen J. Fundamentos de Máquinas Elétricas. Porto Alegre: AMGH, 2013.
- CHESF. Sistema Chesf. **Site da Chesf**, 19 Setembro 2022. Disponível em: <<https://www.chesf.com.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Funil.aspx>>. Acesso em: 2 Setembro 2022.
- EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Site da EPE**, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 25 Agosto 2022.
- EPE; MME. **Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2031**. [S.l.]. 2022.
- FILHO, João M. Manual de Equipamentos Elétricos. Rio de Janeiro: LTC, 2013.
- GABRIEL BENMOUYAL ET AL. **Uma Abordagem Unificada para Chaveamento Controlado dos Equipamentos de Potência**. [S.l.]. 2017.
- GREENWOOD, Allan. **Electrical Transients in Power Systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons Inc., 2001.
- GUERRA, F. D. C. F. Distúrbios de Correntes em Redes Elétricas: Notas de aula. [S.l.]: [s.n.], 2018.
- HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos da Física**. [S.l.]: LTC, 1996.
- HARLOW, J. H. **Electric Power Transformer Engineering**. Boca Raton: CRC Press, 2006.
- HERIVELTO DE SOUZA BRONZEADO ET AL. Chaveamento Controlado de Transformadores: Validação de Estratégia. **Researchgate**, 2004.
- INTEREST Engenharia LTDA. **Diagrama Funcional - Vão 04T1**. Documento de Projeto Emitido. Recife, 2022.

INTEREST Engenharia LTDA. **Diagrama Funcional - Painel Sincronizador.** Documento de Projeto Emitido. Recife, 2022.

INTEREST Engenharia LTDA. **Diagrama de Fiação - Painel Sincronizador.** Documento de Projeto Emitido. Recife, 2022.

JR., Luiz C. Z. **Fundamentos do Sistema Elétrico de Potência.** São Paulo: Livraria da Física, 2006.

MARTINS, Bruno G. IFSC, 10 Setembro 2020. Disponível em: <<http://joinville.ifsc.edu.br/~bruno.martins/SIE/AULA%2011%20-%20SIE%20->>. Acesso em: 2 Setembro 2022.

ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. ONS. **Operador Nacional do Sistema Elétrico**, 01 Janeiro 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 4 Agosto 2022.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Site do ONS**, 13 Setembro 2022. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/paginas/energia-no-futuro/transmissao/instalacoes>>. Acesso em: 1 Setembro 2022.

REED, J.R.; BICKFORD, J.P. **Computation of Power-System Transients.** Londres: Institution of Electrical Engineers, 1980.

SÉRGIO DE OLIVEIRA FRONTIN, ET AL. **Equipamentos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas.** Brasília: Goya Editora, 2013.

SIEMENS. Circuit Breakers Accessories. **Siemens Energy**, 22 Setembro 2022. Disponível em: <<https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/circuit-breakers/accessories.html>>. Acesso em: 21 Setembro 2022.

SLUIS, Lou V. D. **Transients in Power Systems.** Chichester: John Wiley & Sons Ltd, v. 1, 2001.

UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley.** 7ª. ed. Porto Alegre: McGraw Hill Editora, 2014.

