



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

DYEGO HENRIQUE NICÁCIO LOPES

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE VTCD NA REDE DE TRANSMISSÃO

Recife
2023

DYEGO HENRIQUE NICÁCIO LOPES

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE VTCD NA REDE DE TRANSMISSÃO

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.

Orientadora: Profa. Dra. Milde Maria da Silva Lira

Recife
2023

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

Lopes, Dyego Henrique Nicácio.
Análise da Propagação de VTCD na Rede de Transmissão / Dyego Henrique
Nicácio Lopes. - Recife, 2023.
59 : il., tab.

Orientador(a): Milde Maria da Silva Lira
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2023.

Inclui referências, anexos.

1. Propagação de VTCD. 2. Qualidade de Energia Elétrica. 3. Variações de
Tensão de Curta Duração (VTCD). I. Lira, Milde Maria da Silva. (Orientação). II.
Título.

620 CDD (22.ed.)

DYEGO HENRIQUE NICÁCIO LOPES

ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DE VTCD NA REDE DE TRANSMISSÃO

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: 05/05/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Milde Maria da Silva Lira (Orientadora)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Calebe Hermann (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico esse trabalho primeiramente
a Deus e minha família.

AGRADECIMENTOS

É com muita gratidão que venho por meio desta expressar meus sinceros agradecimentos a todos que contribuíram para a realização do meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me concedido saúde e sabedoria para concluir esta etapa tão importante da minha vida acadêmica.

Agradeço também à minha família pelo apoio incondicional em todos os momentos, pelo incentivo e motivação, e por terem sido a base sólida em que eu pude me apoiar durante todo o processo de elaboração do trabalho.

Em especial, agradeço fortemente a minha orientadora, Milde Maria da Silva Lira, pela sua competência, dedicação, paciência e pela disponibilidade em me ajudar em todas as etapas do trabalho. Sua orientação e direcionamento foram fundamentais para a conclusão do meu trabalho, e sou imensamente grato por isso.

Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer aos meus amigos de faculdade, pela amizade, companheirismo, ajuda mútua e pelo incentivo durante todo o curso. A troca de experiências com vocês foi essencial para o meu crescimento pessoal e acadêmico, e tenho certeza de que nossa amizade continuará por muitos anos.

RESUMO

A má qualidade de energia elétrica continua a ser um desafio que ocasiona prejuízos para consumidores de pequeno, médio e de grande porte, apesar de investimentos em tecnologias para melhorias no sistema de transmissão e distribuição. Devido a isso, foi elaborado por meio dos procedimentos de rede do ONS, o Submódulo 9.7 (Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica da Rede Básica) que trata de qualidade de energia elétrica na rede básica. Um dos indicadores avaliados neste submódulo são as conhecidas VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD), um dos fenômenos mais comum e impactante na Qualidade de Energia que gera grandes prejuízos, principalmente para os consumidores indústrias que possuem instalados equipamentos sensíveis a esse fenômeno. Dessa forma, neste trabalho de TCC será analisada a propagação das VTCDs, cujas ocorrências de curtos-circuitos surgiram nos níveis de tensão de 69kV, 230kV e 500kV, com o objetivo de estudar o grau de severidade da VTCD em relação a amplitude na sua propagação ao longo do sistema elétrico de transmissão.

Palavras-chave: Propagação de VTCD, Qualidade da energia elétrica, Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD).

ABSTRACT

Bad power quality is becoming an increasingly common problem in Brazil, causing losses to small, medium, and large consumers. As a result, the ONS (National Electric System Operator) developed through network procedures, submodule 9.7 (Indicators of Power Quality of the Basic Network) which addresses power quality in the basic network. One of the indicators evaluated in this submodule is the well-known Short Duration Voltage Variations (VTCD), one of the most common and impactful phenomena in power quality that causes significant losses, especially for industrial consumers who have sensitive equipment installed. Therefore, this undergraduate thesis work will analyze the propagation of VTCD, whose short-circuit occurrences arose at voltage levels of 69kV, 230kV, and 500kV, with the aim of studying the severity of VTCD in relation to their amplitude propagation along the transmission power system.

Keywords: Power quality, VTCD Propagation, Short Duration Voltage Variations (VTCD).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Tipos de VTCD.....	18
Figura 2 - Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão.	19
Figura 3 - Forma de onda de um afundamento momentânea de tensão (SAG)	20
Figura 4 - Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão (swell).....	20
Figura 5 - Graus de Severidade	23
Figura 6 - Afundamentos de tensões de origens diferentes em um gráfico de magnitude-duração.	24
Figura 7 - Estrutura geral do sistema de energia elétrica, com redes de distribuição e transmissão.....	24
Figura 8 - Rede de distribuição com posições de carga e posições de falhas.	27
Figura 9 - Tipos de afundamentos em função do ângulo da tensão.....	29
Figura 10 - Divisor de tensão, falta simétrica.	30
Figura 11 - Circuito que representa uma falta fase e terra.	31
Figura 12 - Diagrama fasorial das tensões de fase no PAC em sistema solidamente aterrado na carga conectada em estrela.....	33
Figura 13 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em sistema solidamente aterrado na carga conectada em delta.....	34
Figura 14 - Falta monofásica em sistema solidamente aterrado.....	34
Figura 15 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em uma falta bifásica com a carga conectada em estrela.	35
Figura 16 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em uma falta bifásica com a carga conectada em delta.	36
Figura 17 - Falta bifásica	37
Figura 18 - Falta bifásica em sistema solidamente aterrado.	38
Figura 19 - Falta trifásica em sistema solidamente aterrado.	39
Figura 20 - Circuito equivalente de transformadores que filtram a componente de sequência zero.	40
Figura 21 - Circuito equivalente de transformadores que introduz o desfasamento angular.	41
Figura 22 - Circuito equivalente de transformadores que não modificam o afundamento de tensão.....	41

Figura 23 - Mapa Chesf Caso I (Regiões Marcadas)	47
Figura 24 - Gráfico de Severidade do Caso I: 69kV	48
Figura 25 - Mapa Chesf Caso II (Regiões Marcadas)	50
Figura 26 - Gráfico de Severidade do Caso II: 230kV - Grau de Severidade 2 (magnitude 0,44p.u)	51
Figura 27 - Mapa Chef Caso III (Regiões Marcadas)	53
Figura 28 - Gráfico de Severidade do Caso III: 500kV	54

LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração	19
Tabela 2 - Contabilização de afundamentos de tensão no barramento sob avaliação, em função da amplitude e duração do evento.....	22
Tabela 3 - Contabilização de elevações de tensão no barramento sob avaliação, em função da amplitude e duração do evento.	22
Tabela 4 - Propagação de afundamentos de tensão por transformadores trifásicos.	42
Tabela 5 - Estudo do Caso I: 69kV.....	47
Tabela 6 - Estudo do Caso II: 230kV.....	51
Tabela 7 - Estudo do Caso III: 500kV.....	53
Tabela 8 - Tabela de Propagação	55

LISTA DE ABREVIATURAS

Chesf	Companhia Hidro Elétrica do São Francisco
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
p.u	Por Unidade
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	ANÁLISE DO PROBLEMA E MOTIVAÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	16
1.1.1	Objetivo Geral.....	16
1.1.1	Objetivo Específico	16
1.2	ORGANIZAÇÃO TEXTUAL	16
2	VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD).....	18
2.1	FUNDAMENTAÇÕES TEÓRICAS COM RELAÇÃO A VTCD	18
2.2	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	21
2.2.1	Avaliação da Severidade de uma VTCD	23
2.2.1.1	Magnitude e duração de um afundamento de tensão na rede de transmissão	24
2.3	IMPACTO DE UMA VTCD EM CLIENTE DE GRANDE PORTE	25
3	INFLUÊNCIA DA CONEXÃO DE TRANSFORMADORES NAS VARIAÇÕES DE TENSÃO	27
3.1	COMPORTAMENTO DE UM AFUNDAMENTO DE TENSÃO EM UM SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA	27
3.2	CLASSIFICAÇÃO DOS AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DA TENSÃO	28
3.3	TIPOS DE FALTA.....	29
3.3.1	Falta monofásica em sistema solidamente aterrado.....	31
3.3.2	Falta bifásica	35
3.3.3	Falta bifásica em sistema solidamente aterrado e trifásica	37
3.4	INFLUENCIA COM RELAÇÃO AO TIPO DE CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES NA PROPAGAÇÃO DE UMA VTCD	40
3.4.1	Transferência de uma VTCD através dos tipos de transformadores	42
3.4.1.1	Falta monofásica, carga conectada em estrela e sem transformador.....	42
3.4.1.2	Falta monofásica, carga conectada em Delta e sem transformador	42
3.4.1.3	Falta monofásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 2	42
3.4.1.4	Falta monofásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 2	43
3.4.1.5	Falta monofásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 3	43
3.4.1.6	Falta monofásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 3	43
3.4.1.7	Falta bifásica, carga conectada em Estrela e sem transformador	44
3.4.1.8	Falta bifásica, carga conectada em Delta e sem transformador	44
3.4.1.9	Falta bifásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 2	44
3.4.1.10	Falta bifásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 2	44
3.4.1.11	Falta bifásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 3	44
3.4.1.12	Falta bifásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 3	45
4	ESTUDOS DE CASO	46
4.1	CASO I (OCORRÊNCIA NO 69KV- GRAU DE SEVERIDADE 2)	46
4.1.1	Análise da Propagação da Severidade do Caso I (69kV – Grau de Severidade 2)	48

4.2	CASO II (OCORRÊNCIA NO 230KV – GRAU DE SEVERIDADE 2).....	49
4.2.1	Análise da Propagação da Severidade do Caso II (230kV – Grau de Severidade 2	51
4.3	CASO III (OCORRÊNCIA NO 500KV – GRAU DE SEVERIDADE 3).....	52
4.3.1	Análise da Propagação da Severidade do Caso III (500kV – Grau de Severidade 3)	54
4.4	ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DOS CASOS.....	55
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	57
5.1	CONCLUSÃO	57
5.2	RECOMENDAÇÕES	57
	REFERÊNCIAS.....	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Análise do Problema e Motivação

A qualidade da energia elétrica é um tema cada vez mais preocupante para o Brasil, principalmente devido aos equipamentos sensíveis que se encontram na região Nordeste, que enfrentam grandes desafios para manter uma rede elétrica confiável. As variações de tensão de curta duração (VTCD) são um dos principais problemas enfrentados pelos clientes, em especial no setor industrial.

Os problemas da qualidade de energia na rede elétrica brasileira estão relacionados a uma série de fatores, os mais comuns são:

- Envelhecimento e falta de manutenção da infraestrutura elétrica;
- Falhas em equipamentos e sistemas de proteção;
- Sobrecarga do sistema elétrico, causada pelo aumento da demanda de energia.

Para enfrentar esses desafios, a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (Chesf) tem buscado investir em tecnologias para monitorar e controlar a rede elétrica. Segundo informações divulgadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Chesf investiu cerca de R\$ 176 milhões em projetos de modernização e ampliação da infraestrutura elétrica em 2021 (Chesf, 2021).

Apesar dos esforços da Chesf e do ONS, as VTCDs ainda são um problema que afeta a população e as empresas em todo o país, conforme destacado em matéria da Folha de SP (FOLHA DE SÃO PAULO, 2022). A reportagem ainda aponta que a modernização da rede elétrica brasileira é fundamental para garantir a confiabilidade do sistema e a qualidade da energia fornecida aos consumidores.

Portanto, é necessário que haja um estudo com relação a como as VTCDs se comportam com relação aos seus raios de propagação, com isso o esforço contínuo para investir em infraestrutura e modernizar a rede elétrica brasileira como um todo, garantindo a segurança e a eficiência do sistema elétrico e evitando transtornos para os consumidores.

1.1 Objetivos do Trabalho

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a propagação das VTCDs nas redes de transmissão de energia elétrica.

1.1.1 Objetivo Específico

Este trabalho tem como objetivo estudar três casos de ocorrência em linhas de 69kV, 230kV e 500kV que ocorreram nos barramentos das subestações da Chesf. A análise desses casos permitirá compreender as causas e os efeitos das VTCD em diferentes níveis de tensão e contribuirá para aprimorar as políticas de regulação do setor elétrico, bem como para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes de mitigação de riscos para clientes de diferentes setores.

Para alcançar esses objetivos, serão utilizados os dados coletados a partir de análises técnicas e de campo, além da revisão bibliográfica sobre o tema. Espera-se que os resultados obtidos nesse estudo possam contribuir para uma melhor compreensão do fenômeno das VTCD e para o desenvolvimento de soluções efetivas para reduzir seus impactos na qualidade da energia elétrica fornecida aos clientes.

1.2 Organização Textual

Com o objetivo de embasar teoricamente os temas abordados neste trabalho, foi realizada uma pesquisa bibliográfica que contemplou normas técnicas, artigos, monografias, dissertações, regulamentações e livros. Através dessa pesquisa, buscou-se compreender melhor as VTCDs e seus efeitos sobre as linhas de transmissão do nordeste, a fim de facilitar o desenvolvimento da discussão.

A presente pesquisa foi estruturada em três seções principais, abrangendo uma revisão bibliográfica, um estudo de caso e uma análise dos resultados do estudo, as quais culminaram em conclusões.

No primeiro capítulo se encontra a Análise do Problema e Motivação da Monografia e os Objetivos do Trabalho.

No segundo capítulo se encontra a primeira parte da fundamentação teórica do TCC que abrange todo o universo da VTCD, comentando da sua fundamentação teoria, metodologia de transmissão e impacto.

No terceiro capítulo se encontra a segunda parte da fundamentação teórica do TCC que abrange a parte de variação de tensão em transformadores.

No quarto capítulo foi apresentado todo o estudo dos casos, informando a suas origens e descrevendo detalhadamente os seus problemas. Após isso foi feita uma análise dos mesmos, definindo uma possível causa das diferenças encontradas.

No quinto capítulo é apresentada a conclusão deste trabalho e recomendações para problemas que foram citados no decorrer desse trabalho

2 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD)

Neste capítulo, serão demonstrados os conceitos segundo o procedimento de rede para as VTCD, e os principais problemas com relação a qualidade de energia elétrica.

2.1 Fundamentações Teóricas com relação a VTCD

VTCD é um evento aleatório de tensão caracterizado por desvio significativo, por um curto intervalo de tempo, do valor eficaz da tensão. A VTCD em sua maioria refere-se a tensão de fase-neutro e é descrita monofasicamente pelos parâmetros, duração e amplitude (ONS, 2020.12).

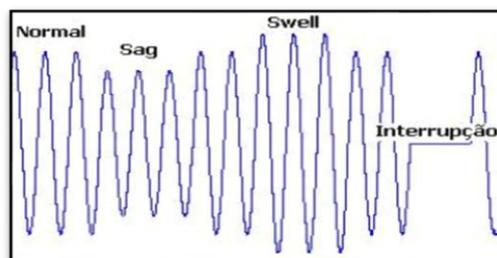
O conceito de duração de uma VTCD é dado pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão de acordo com a tensão nominal do sistema em um certo ponto ultrapassa certo limite e o momento em que essa variável volta a cruzar esse limite.

O conceito de Amplitude de um VTCD é definido pelo maior valor eficaz de tensão em relação à tensão nominal do sistema.

As VTCD's são classificadas à partir das suas durações e amplitudes de acordo com o que se apresenta na Tabela 1, conforme os Procedimentos de Transmissão do Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS).

As VTCD englobam os eventos com intervalos de tempo inferiores ou iguais a três segundos, que são identificadas por interrupção, afundamentos (Sag), elevação temporária de tensão (swell), como pode ser observado na Figura 1.

Figura 1 - Tipos de VTCD.



Fonte: (FERNANDES, 2007)

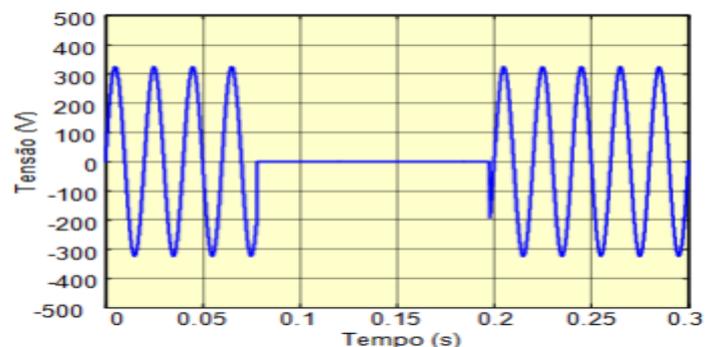
Tabela 1 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração

Tipo de VTCD	Duração da VTCD	Amplitude da VTCD, em relação à tensão nominal
Interrupção momentânea de tensão – IMT	inferior ou igual a 3 (três) segundos	inferior a 0,1 pu
Afundamento momentâneo de tensão – AMT (Sag)	igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação momentânea de tensão – EMT	igual ou superior a um ciclo e inferior ou igual a 3 (três) segundos	superior a 1,1 pu
Interrupção temporária de tensão – ITT	superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	inferior a 0,1 pu
Afundamento temporário de tensão – ATT	superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	igual ou superior a 0,1 e inferior a 0,9 pu
Elevação temporária de tensão – ETT	superior a 3 (três) segundos e inferior ou igual a 1 (um) minuto	superior a 1,1 pu

Fonte: (ONS, 2020.12)

Interrupção Momentânea de Tensão é definida como o evento em que o valor eficaz da tensão é inferior a 0,1 pu da tensão nominal. Tendo como duração da variação um tempo inferior ou igual a 3 (três) segundos. A forma de onda é apresentada na Figura 2.

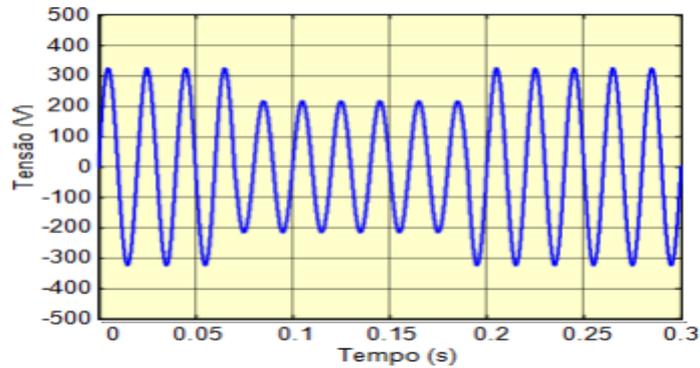
Figura 2 - Forma de onda de uma interrupção momentânea de tensão.



Fonte:(TAVARES,2015).

Afundamento momentâneo de tensão é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu. Tendo como duração da variação um tempo Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos. A forma de onda é apresentada na Figura 3.

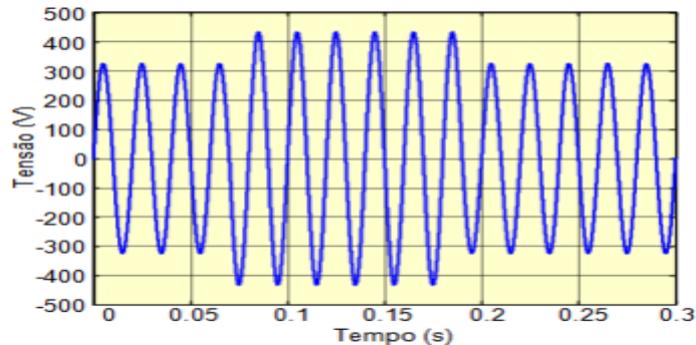
Figura 3 - Forma de onda de um afundamento momentânea de tensão (SAG)



Fonte:(TAVARES,2015).

Elevação momentânea de tensão é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior 1,1 pu. Tendo como duração da variação um tempo Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos. A forma de onda é apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Forma de onda de uma elevação momentânea de tensão (swell)



Fonte:(TAVARES,2015).

Interrupção temporária de tensão é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é inferior 0,1 pu. Tendo como duração da variação um tempo superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto.

Afundamento temporário de tensão é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 pu. Tendo como duração da variação um tempo superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto.

Elevação temporária de tensão é definido como o evento em que o valor eficaz da tensão é superior 1,1 pu. Tendo como duração da variação um tempo superior a três segundos e inferior ou igual a um minuto.

O fenômeno mais comum que pode ocorrer em uma VTCD é afundamento momentâneo de tensão (Sag / AMT) o qual será a base desse estudo.

2.2 Metodologia de Medição

Além dos parâmetros de duração e magnitude já estabelecidos, a intensidade de uma VTCD (medida entre fase e neutro, de um determinado barramento) também é caracterizada pela frequência de ocorrência. Este é o número de vezes que cada combinação de parâmetros de duração e tamanho ocorreu durante um determinado período de tempo em que o barramento foi monitorado.

Em um específico ponto de monitoração uma VTCD se tem características a partir da combinação dos parâmetros amplitude e duração de cada evento fase e neutro. Com isso os eventos fase-neutro que ocorrem de forma simultânea, são agregados compondo um único evento no ponto de monitoração (agregação de fases). A agregação de fases deve ser efetuada pelo conceito da união de fases. A duração de um evento tem como definição o intervalo de tempo em que o primeiro dos eventos fase-neutro ultrapassa um certo limite e o instante que o evento fase-neutro final retorna para um determinado limite.

Afundamentos ou elevações consecutivas, só podem ser agregados de forma temporal quando o período entre o início dos eventos consecutivos for menor que 1 (um) minuto. O afundamento que caracteriza o intervalo de tempo de 1 (um) minuto é o de menor amplitude e a elevação que caracteriza o intervalo de tempo de 1 (um)

minuto é a de maior amplitude. Se tem que a frequência de ocorrência, em base anual, é o indicador utilizado para avaliar os eventos de VTCD em um barramento.

A contabilização das combinações duração e amplitude de afundamentos de tensão tem que ser efetuada em intervalos conforme a Tabela 2, sabendo que os valores da amplitude estão em p.u da tensão nominal do barramento.

A contabilização das combinações duração e amplitude de elevações de tensão tem que ser efetuada em intervalos conforme a Tabela 3, sabendo que os valores da amplitude estão em p.u da tensão nominal do barramento.

Tabela 2 - Contabilização de afundamentos de tensão no barramento sob avaliação, em função da amplitude e duração do evento.

Amplitude [pu]	Duração				
	[16,67 ms-300 ms]	(300 ms-600 ms]	(600 ms-1 s]	(1 s-3 s]	(3 s-1 min]
(0,85 - 0,90]					
(0,80 - 0,85]					
(0,70 - 0,80]					
(0,60 - 0,70]					
(0,50 - 0,60]					
(0,40 - 0,50]					
(0,30 - 0,40]					
(0,20 - 0,30]					
[0,10 - 0,20]					
< 0,10					

Fonte: (ONS, 2020.12).

Tabela 3 - Contabilização de elevações de tensão no barramento sob avaliação, em função da amplitude e duração do evento.

Amplitude [pu]	Duração				
	[16,67 ms-300 ms]	(300 ms-600 ms]	(600 ms-1 s]	(1 s-3 s]	(3 s-1 min]
[1,10 - 1,40]					
> 1,40					

Fonte: (ONS, 2020.12).

2.2.1 Avaliação da Severidade de uma VTCD

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são comuns em sistemas elétricos e podem ter diferentes graus de severidade. A severidade de uma VTCD é determinada pela magnitude da variação de tensão e duração com que ocorre.

A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão, dentre as três fases, enquanto perdurar o evento. A duração da VTCD é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite e o instante em que essa variável volta a cruzar esse limite. No caso de um sistema trifásico, para calcular a duração mencionada, é necessário analisar o comportamento do valor RMS das três fases. O instante inicial é considerado quando a primeira fase cai abaixo do limiar, e a contabilização dessa duração só é interrompida quando todas as fases retornam acima desse limiar (ONS, 2020.12).

A Divisão de Gestão de Qualidade da Operação da Chesf para avaliar a gravidade de um VTCD, definiu os graus de severidades em uma escala de 0 (zero) a 4 (quatro), como pode ser notado pela Figura 5. Adotando como característica a magnitude e duração do afundamento de tensão, e a sensibilidade necessitada pelas que estão conectadas à respectiva barra. Foi utilizada uma técnica de agregação de tempo para apresentar os resultados resumidos, utilizando uma "janela deslizante" de um minuto para agregar os eventos. Para os eventos em que a tensão retida foi inferior a 10%, foram utilizadas as abreviações IMT e ITT, que significam Momentary and Temporary Voltage Interruptions, respectivamente.

Figura 5 - Graus de Severidade

0,9		Severidade 0	Severidade 0	Severidade 1	Severidade 2
0,8		Severidade 0	Severidade 1	Severidade 2	Severidade 3
0,7		Severidade 1	Severidade 2	Severidade 3	Severidade 4
0,6		Severidade 2	Severidade 3	Severidade 4	Severidade 5
0,5		Severidade 3	Severidade 4	Severidade 5	Severidade 6
0,4		Severidade 4	Severidade 5	Severidade 6	Severidade 7
0,3		Severidade 5	Severidade 6	Severidade 7	Severidade 8
0,2		Severidade 6	Severidade 7	Severidade 8	Severidade 9
0,1		Severidade 7	Severidade 8	Severidade 9	Severidade 10
0	1 ciclo	300ms	500ms	3s	1min

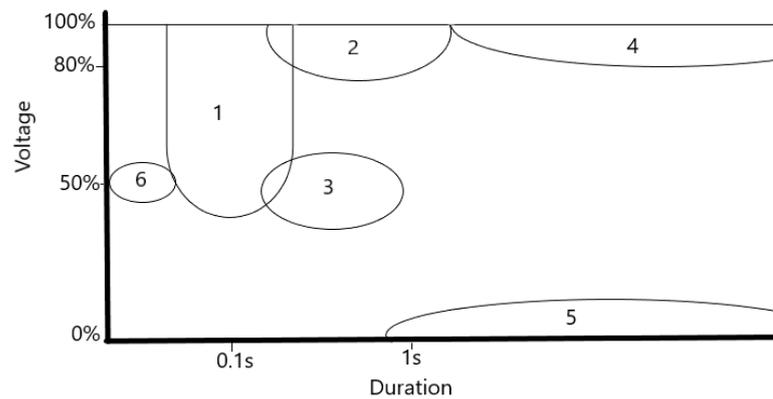
Fonte: (LEITÃO, 2004).

2.2.1.1 Magnitude e duração de um afundamento de tensão na rede de transmissão

Conhecendo a magnitude e a duração de um afundamento de tensão, ele pode ser representado por um ponto em um plano magnitude-duração. Os números na Figura 6 referem-se às seguintes origens de afundamentos de tensão:

1. Falta no sistema de transmissão
2. Falta no sistema de distribuição remoto
3. Falta no sistema de distribuição local
4. Partida de motores grandes
5. Interrupções curtas
6. Fusíveis

Figura 6 - Afundamentos de tensões de origens diferentes em um gráfico de magnitude-duração.



Fonte: (ADAPTADO BOLLEN, 2000).

Figura 7 - Estrutura geral do sistema de energia elétrica, com redes de distribuição e transmissão.



Fonte: (ADAPTADO BOLLEN, 2000).

Para uma falta em qualquer rede de distribuição, a duração da queda de tensão pode durar alguns segundos. No entanto, quando a falta ocorre em um sistema de distribuição remoto, o afundamento será muito mais fraco devido à impedância do transformador entre a falta e o ponto de fornecimento.

As faltas no sistema de transmissão geralmente são eliminadas dentro de 100 a 150ms, produzindo assim afundamentos de tensão de curta duração. Os fusíveis que realizam o seccionamento do circuito resultam em afundamentos de duração de um ciclo ou menos, e afundamentos com magnitude mais profunda se a falta estiver no sistema de distribuição local ou em de baixa tensão. Faltas em redes remotas, eliminadas por meio de fusíveis, levam a afundamentos curta duração e magnitudes mais fracas. Por fim, a Figura 6 contém os afundamentos de tensão devido ao acionamento de motores, tanto de duração curta com a magnitude mais forte, quanto de duração curta e magnitude mais fraca (Bollen, 2002).

2.3 Impacto de uma VTCD em cliente de grande porte

As VTCDs podem ter efeitos significativos em clientes do grande porte com alto consumo de energia elétrica. Essas variações podem ser causadas por diversos fatores, como descargas atmosféricas, falhas em equipamentos da rede elétrica, manobras na rede e outros eventos que afetam o fornecimento de energia.

Quando ocorrem variações de tensão, os equipamentos eletrônicos conectados à rede elétrica podem ser afetados de diferentes maneiras. As sags de tensão, por exemplo, podem causar mau funcionamento ou desligamento de equipamentos sensíveis, como computadores, servidores, sistemas de iluminação, máquinas de produção e outros dispositivos eletrônicos.

Por outro lado, as sobretensões, também podem ser prejudiciais para os equipamentos eletrônicos, pois podem causar danos permanentes, como queima de componentes internos.

Esses efeitos podem ser particularmente problemáticos para as empresas de grande porte, que dependem de equipamentos sensíveis para operar seus negócios. Os custos associados a falhas em equipamentos podem ser significativos, incluindo a

perda de dados, falhas na produção, interrupções no fornecimento de serviços e outros problemas que podem afetar negativamente a reputação da empresa.

No estudo do EPRI (Electric Power Research Institute), foram testados diversos equipamentos eletrônicos para avaliar sua sensibilidade a variações de tensão e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Os equipamentos testados incluíram computadores, servidores, controladores de processo, sistemas de iluminação, entre outros dispositivos eletrônicos. Para cada um dos equipamentos testados, foram realizados testes para medir sua sensibilidade a diferentes tipos de problemas de energia, incluindo sags de tensão, interrupções de energia, variações de frequência e oscilações de tensão.

Os resultados do estudo mostraram que a maioria dos equipamentos testados era sensível a variações de tensão e interrupções no fornecimento de energia elétrica.

Segue abaixo alguns exemplos de dispositivos eletrônicos e informações com relação as suas sensibilidades:

- Controladores de Resfriamentos: Os quais tem uma sensibilidade elevada a subestações quando os valores caem 20%, ou seja, permanecem 80% do que seria a sua tensão nominal. Um bom exemplo disso são os condensadores. (EPRI, 1995).
- Acionadores de corrente contínua: Equipamento muito comum no meio das grandes indústrias, aos quais possuem um nível de sensibilidade elevado com relação a variação de tensão, quando ocorre afundamentos podem chegar a 88% da sua tensão nominal. (EPRI, 1995).
- Controladores lógicos programáveis (PLC ou CLP): São equipamentos que podem aguentar até 15 ciclos de interrupções. Os mesmos consideram valores de afundamentos de até 50% da sua tensão nominal. (EPRI, 1995).

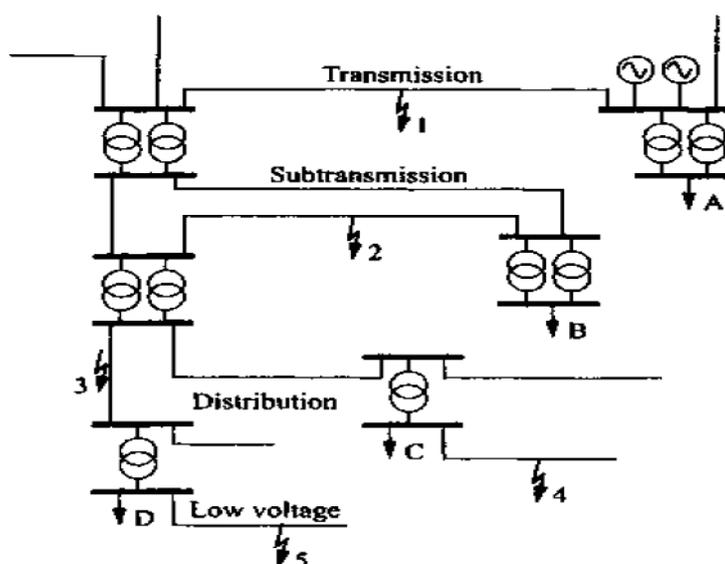
3 INFLUÊNCIA DA CONEXÃO DE TRANSFORMADORES NAS VARIAÇÕES DE TENSÃO

3.1 Comportamento de um afundamento de tensão em um sistema de energia elétrica

Na Figura 8, pode se notar o sistema de energia elétrica que será usado como base, para analisarmos o comportamento de um afundamento de tensão. Os números de 1 a 5 indicam as posições das faltas e as letras de A à D indicam as cargas. Se ocorrer uma falta na posição 1 da rede de transmissão, as duas subestações vizinhas da linha com falta experimentarão um afundamento significativa de tensão. (BOLLEN, 2000).

Esse afundamento de tensão será então transferido para todos os clientes que recebem energia dessas duas subestações. Como resultado, todos os clientes A, B, C e D experimentarão um afundamento profundo de tensão. No entanto, o afundamento de tensão experimentada por A provavelmente será um pouco menor, pois os geradores conectados a essa subestação manterão a tensão.

Figura 8 - Rede de distribuição com posições de carga e posições de falhas.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

Por outro lado, uma falta na posição 2 não causará um grande afundamento de tensão para o cliente A, uma vez que a impedância dos transformadores entre o sistema de transmissão e o subtransmissão é grande o suficiente para limitar consideravelmente o afundamento de tensão no lado de alta tensão do transformador. Além disso, o afundamento de tensão experimentado pelo cliente A é ainda mitigada pelos geradores que alimentam a subestação de transmissão local. No entanto, a falta na posição 2 causará um afundamento profundo de tensão em ambas as subestações de subtransmissão e, portanto, em todos os clientes alimentados por elas (B, C e D).

Caso haja uma deficiência na posição 3 do sistema, é de se esperar que o consumidor D sofra com um afundamento de tensão considerável, seguido por uma interrupção de curta ou longa duração, dependendo do momento em que a proteção entrar em ação. Por outro lado, o consumidor C experimentará apenas um afundamento acentuado de energia. Caso seja adotado o método de recuperação rápida no sistema de distribuição, o consumidor C enfrentará dois ou mais afundamentos consecutivos no caso de uma falta permanente.

Em virtude da impedância do transformador, o cliente B será afetado apenas por um afundamento de energia superficial, decorrente da falta na posição 3. O consumidor A, por sua vez, não perceberá qualquer alteração significativa relacionada a essa deficiência. Ademais, a falta na posição 4 resultará em um afundamento acentuado de energia para o consumidor C e um afundamento superficial para o consumidor D.

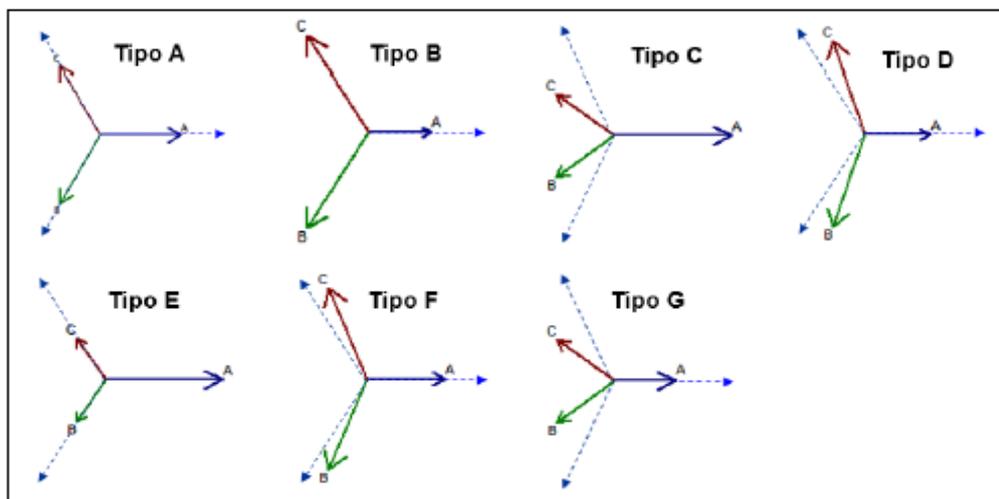
Por outro lado, a falta na posição 5 terá o efeito oposto, isto é, o consumidor D sofrerá um afundamento acentuado de energia, enquanto o consumidor C enfrentará um afundamento superficial. É importante ressaltar que os consumidores A e B não serão impactados pelas deficiências nas posições 4 e 5.

3.2 Classificação dos afundamentos de tensão em função do ângulo da tensão

Se tem que os tipos de afundamentos de tensão são baseados na magnitude e ângulo (durante o afundamento) de cada uma das três fases. Os fatores que prejudicam o tipo de afundamento de tensão nos terminais de um determinado equipamento, são três: conexão dos enrolamentos do transformador, o tipo da falta e

a conexão da carga (Bollen, 2000). Combinando os três fatores, se tem como resultado sete tipos de afundamentos, como pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Tipos de afundamentos em função do ângulo da tensão.



Fonte:(MELO J., 2022).

Os fasores de tensão antes do distúrbio estão sendo representados pelas linhas tracejadas, os fasores de tensão quando está ocorrendo o afundamento de tensão estão sendo representados pelas linhas contínuas. Se nota que os afundamentos de tensão além de modificarem a magnitude de tensão, modificam juntos os ângulos entre vetores.

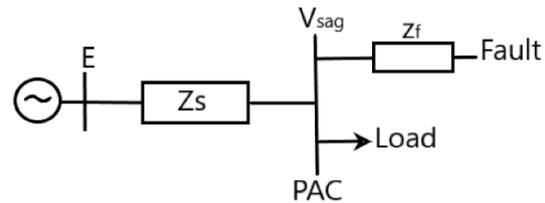
3.3 Tipos de Falta

Com o intuito de expressar de forma matemática cada um dos sete tipos de afundamentos de tensão, é imprescindível realizar a modelagem de cada tipo de curto-circuito. A grande parte das faltas no Sistema Elétrico de Potência (SEP) são de natureza fase-terra simples, o que acarreta, conseqüentemente, em afundamentos de tensão desequilibrados (MELO J., 2022).

Para determinar a magnitude de um afundamento de tensão causado por uma falta, será utilizado o modelo do divisor de tensão, como pode ser observado na Figura 10. Nessa figura podem ser notadas duas impedâncias: Z_S é a impedância da fonte no ponto de acoplamento comum (PAC), e Z_F é a impedância entre o ponto de

acoplamento comum e o ponto de falta. O ponto de acoplamento comum é o ponto a partir do qual tanto a falta e a carga são alimentadas, ou seja, o barramento.

Figura 10 - Divisor de tensão, falta simétrica.



Fonte: (Bollen, 2000).

A tensão no PAC pode ser descrita como:

$$V_{SAG} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \cdot E \quad (1.1)$$

$$V_{SAG} = \frac{Z_F}{Z_S + Z_F} \quad (1.2)$$

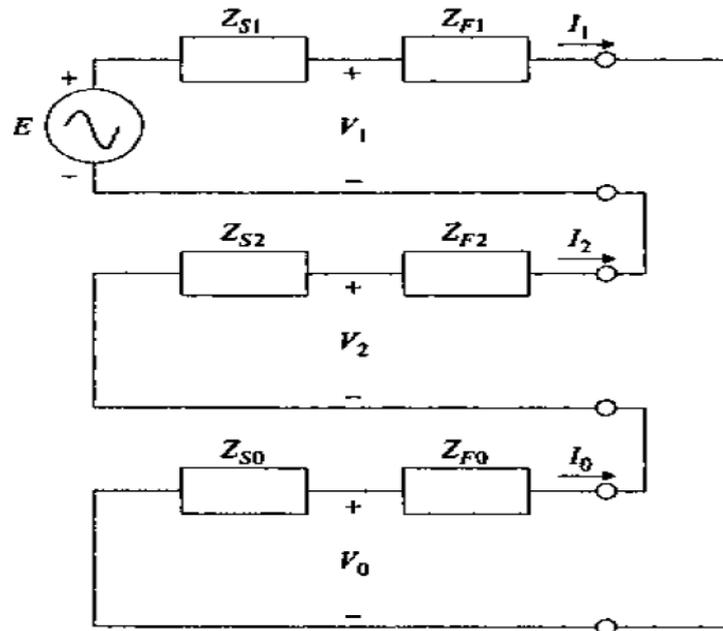
Adotando que a tensão pré-distúrbio é de $1 \angle 0^\circ$ p.u, (1) se obtém:

Com isso se conclui que quanto maior for a distância da carga ao ponto de falta, menos severo o afundamento será (BOLLEN, 2000).

3.3.1 Falta monofásica em sistema solidamente aterrado

O curto-circuito é uma falta desequilibrada, com isso a teoria de componente simétrica pode ser usada para calcular a tensão após a falta. Como mostrado na Figura 11, que mostra o circuito equivalente de sequência simétrica para a falta fase-terra, onde, V_1 , V_2 e V_0 representam a sequência positiva e os componentes de sequência negativa e sequência zero da tensão no PAC, respectivamente. A impedância z_{Si} representa a impedância da fonte, o z_{Fi} representa a impedância de falta, o índice $i = 1, 2$ e 0 seriam a sequência positiva, sequência negativa e sequência zero.

Figura 11 - Circuito que representa uma falta fase e terra.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

Descrevendo as componentes de sequência da tensão no PAC, adotando a tensão pré-falta $1 \angle 0^\circ$:

$$\vec{V}_1 = \frac{Z_{F1} + Z_{S2} + Z_{F2} + Z_{S0} + Z_{F0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (1.3)$$

$$\vec{V}_2 = \frac{Z_{S2}}{(Z_{E1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (1.4)$$

$$V_0 = \frac{Z_{S0}}{(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + (Z_{S1} + Z_{S2} + Z_{S0})} \quad (1.5)$$

Adotando que a carga conectada ao PAC está com o tipo de conexão estrela, se tem que as tensões de linha-neutro que ocorre durante a falta são expressas nas (6)-(7), adotando $\alpha=1 \angle 120^\circ$:

$$\vec{V}_a = \vec{V}_0 + \vec{V}_1 + \vec{V}_2 \quad (3.6)$$

$$\vec{V}_b = a^2 \cdot \vec{V}_1 + a \cdot \vec{V}_2 + \vec{V}_0 \quad (1.7)$$

$$\vec{V}_c = a \cdot \vec{V}_1 + a^2 \cdot \vec{V}_2 + \vec{V}_0 \quad (3.8)$$

Aplicando as substituições das equações (3)-(5) em (6)-(8):

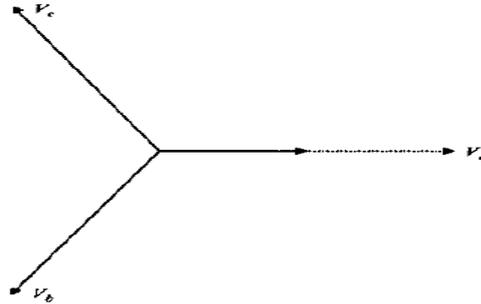
$$\vec{V}_a = 1 - \frac{Z_{S1}}{\frac{1}{3}(Z_{F1} + Z_{F2} + Z_{F0}) + Z_{S1}} \quad (1.9)$$

$$\vec{V}_b = a^2 \quad (1.10)$$

$$\vec{V}_c = a \quad (3.11)$$

Na Figura 12 se nota o diagrama fasorial resultante, o qual representa o afundamento tipo B apresentado na Figura 9.

Figura 12 - Diagrama fasorial das tensões de fase no PAC em sistema solidamente aterrado na carga conectada em estrela.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

As tensões de fase em um sistema solidamente aterrado, podem ser reescritas como (valores em p.u):

$$\vec{V}_a = h \quad (1.12)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (3.13)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (1.14)$$

Adotando h como a magnitude da tensão após ocorrer a falta. Para uma falta do tipo fase-terra com a carga conectada em estrela, se tem um afundamento do tipo B. Com a carga conectada em delta, as tensões de linhas podem ser representadas por (valores em p.u):

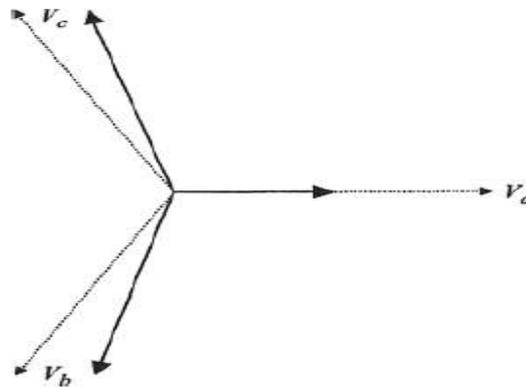
$$\vec{V}_a = j \frac{\vec{V}_b - \vec{V}_c}{\sqrt{3}} = 1 \quad (3.15)$$

$$\vec{V}_b = j \frac{\vec{V}_c - \vec{V}_a}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{2} - j\left(\frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3}h\right) \quad (3.16)$$

$$\vec{V}_c = j \frac{\vec{V}_a - \vec{V}_b}{\sqrt{3}} = -\frac{1}{2} + j\left(\frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{3}}{3}h\right) \quad (3.17)$$

Com o objetivo de rotacionar os fasores em 90 graus, foi multiplicado por j as equações, podendo notar o diagrama fasorial das tensões linha-linha do afundamento de tensão gerado por uma falta fase-terra, na Figura 13.

Figura 13 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em sistema solidamente aterrado na carga conectada em delta.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

O diagrama da Figura 14 é semelhante ao caso tipo C, mas Bollen (2000) o define como o tipo C*. O asterisco indica que a fase do afundamento e a magnitude difere do tipo C, devido ao termo $(\frac{1}{3} + \frac{2}{3}h)$.

Figura 14 - Falta monofásica em sistema solidamente aterrado

Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$	<p>Tipo B</p>
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - j\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h\right)\sqrt{3}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + j\left(\frac{1}{6} + \frac{1}{3}h\right)\sqrt{3}$	<p>Tipo C*</p>

Fonte: (MELO J., 2022).

3.3.2 Falta bifásica

Durante uma falta bifásica, as tensões nas duas fases afetadas se aproximam uma da outra. Adotando que a carga está conectada em estrela, as expressões para as tensões de fase para neutro durante uma falta bifásica são as seguintes (Adotando 'h' como a magnitude em p.u):

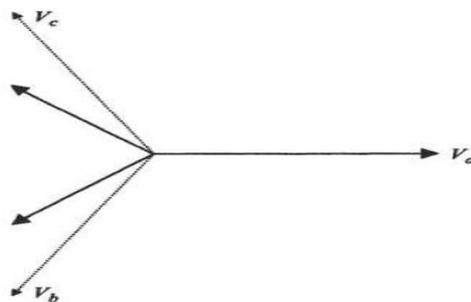
$$\vec{V}_a = 1 \quad (3.18)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (1.19)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.20)$$

Pode-se notar pela Figura 15, as tensões de fase-neutro no PAC antes da falta bifásica (linha pontilhada) e depois da ocorrência da falta bifásica (linha sólida), existe uma diminuição no ângulo entre os fasores \vec{V}_b e \vec{V}_c .

Figura 15 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em uma falta bifásica com a carga conectada em estrela.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

De maneira análoga, segue as expressões para uma carga conectada em delta:

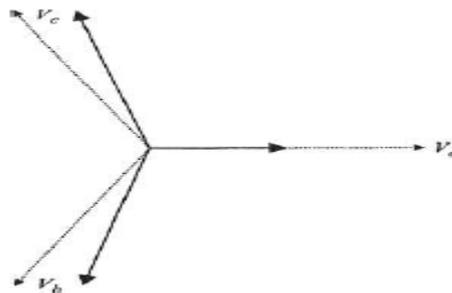
$$\vec{V}_a = h \quad (1.21)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (3.22)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (3.23)$$

Pode-se notar pela Figura 16, as tensões de fase-neutro no PAC antes da falta bifásica (linha pontilhada) e depois da ocorrência da falta bifásica (linha sólida), existe um aumento no ângulo entre os fasores \vec{V}_b e \vec{V}_c .

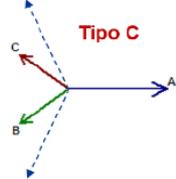
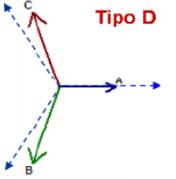
Figura 16 - Diagrama fasorial das tensões de linha no PAC em uma falta bifásica com a carga conectada em delta.



Fonte: (BOLLEN, 2000).

Quando ocorre uma falta bifásica, a carga conectada em estrela sofre uma queda de tensão nas duas fases, enquanto a carga conectada em delta experimenta uma queda de tensão nas três fases. No caso da carga conectada em estrela, a queda máxima é de 50% quando $h=0$ (zero). No entanto, para a carga conectada em delta, uma fase pode sofrer uma queda completa até atingir zero, se pode notar as expressões e fasores da carga ligada em delta ou estrela na Figura 17.

Figura 17 - Falta bifásica

Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2}j \cdot h$	 <p>Tipo C</p>
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2}j$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2}j$	 <p>Tipo D</p>

Fonte: (MELO J., 2022).

3.3.3 Falta bifásica em sistema solidamente aterrado e trifásica

Faltas bifásicas em sistemas solidamente aterrados podem ser tratadas da mesma forma que faltas monofásicas e bifásicas. Assumindo que a tensão na fase não é afetada pela falta, isso equivale à situação em que as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero são iguais. Se a impedância de sequência zero for maior que a impedância de sequência positiva, as tensões resultantes serão deslocadas em direção às tensões de uma falta bifásica. As expressões para uma falta bifásica em um sistema solidamente aterrado considerando a carga conectada em estrela é a seguinte (Adotando 'h' como a magnitude em p.u):

$$\vec{V}_a = 1 \quad (3.24)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.25)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.26)$$

Expressões com a carga ligada em delta:

$$\vec{V}_a = h \quad (1.27)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}h - \frac{1}{6}hj\sqrt{3} \quad (3.28)$$

$$\vec{V}_c = \frac{1}{3}j\sqrt{3} - \frac{1}{2}h - \frac{1}{6}hj\sqrt{3} \quad (1.29)$$

As expressões podem ser observadas juntos com os respectivos fasores na Figura 18.

Figura 18 - Falta bifásica em sistema solidamente aterrado.

Carga conectada em estrela $\vec{V}_a = 1$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2} \cdot h - \frac{\sqrt{3}}{2} j \cdot h$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2} \cdot h + \frac{\sqrt{3}}{2} j \cdot h$	<p>Tipo E</p>
Carga conectada em delta $\vec{V}_a = h$ $\vec{V}_b = -\frac{1}{2}h - j\left(\frac{1}{6}h + \frac{1}{3}\right)\sqrt{3}$ $\vec{V}_c = -\frac{1}{2}h + j\left(\frac{1}{6}h + \frac{1}{3}\right)\sqrt{3}$	<p>Tipo F</p>

Fonte: (MELO J., 2022).

De maneira análoga as expressões anteriores podemos obter a equação para uma falta trifásica, os fasores podem ser observados na Figura 19:

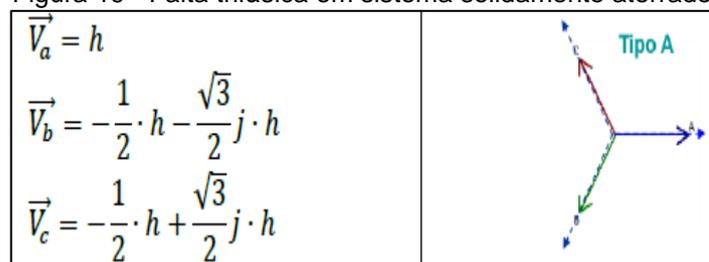
$$\vec{V}_a = h \quad (3.30)$$

$$(3.31)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{2}h - \frac{1}{2}hj\sqrt{3}$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{2}h + \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.32)$$

Figura 19 - Falta trifásica em sistema solidamente aterrado.



Fonte: (MELO J., 2022).

O afundamento de tensão tipo G, não pode ser observado por uma carga que tenha a conexão no ponto em que a falta ocorre, independente do seu tipo de conexão. No entanto, se uma falta bifásica-terra tiver a sua propagação através de um transformador do tipo estrela-estrela, delta-delta ou delta-ziguezague (que são transformadores Tipo 2, os quais serão estudados no capítulo 3.4), não aterrado, a componente de sequência zero desse afundamento será filtrada e uma carga que esteja com conexão no secundário do transformador perceberá um afundamento de tensão do tipo G (MELO J., 2022).

O afundamento de tensão tipo G pode ser caracterizado pela seguinte equação:

$$\vec{V}_a = \frac{2}{3} + \frac{1}{3}h \quad (3.33)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}h - \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.34)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{3} - \frac{1}{6}h + \frac{1}{2}hj\sqrt{3} \quad (3.35)$$

3.4 Influencia com relação ao tipo de conexão dos transformadores na propagação de uma VTCD

No estudo da propagação das VTCD, os transformadores trifásicos são classificados em três grupos:

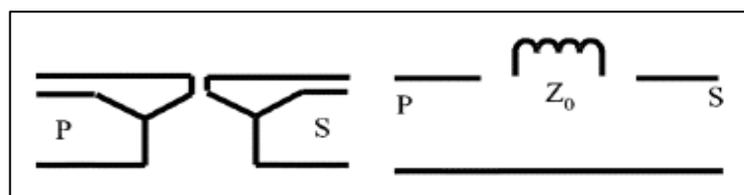
Tipo 1 – transformadores não tem a alteração dos afundamentos de tensão, em p.u., as tensões no primário são iguais às do secundário, em p.u.. Transformadores que se enquadram nesse tipo são os de conexão estrela-estrela (Yy) e com os dois enrolamentos aterrados (YNyn).

Tipo 2 – Transformadores que conseguem filtrar a componente de sequência zero, entretanto não introduzem o deslocamento angular. Transformadores que se enquadram nesse tipo são os de conexão estrela-estrela (Yy), delta-delta (Dd) e o delta-ziguezague (Dz).

Tipo 3 - Transformadores que introduzem o deslocamento angular. Transformadores que se enquadram nesse tipo são os de conexão estrela-delta (Yd), delta-estrela (Dy) e delta-ziguezague (Yz).

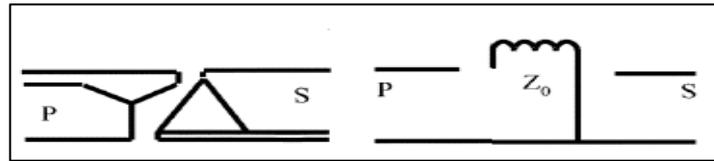
Os casos comentados anteriormente podem ser visualizados nas Figuras 20, 21 e 22 a mesma demonstra os tipos de transformadores e seus respectivos circuitos equivalentes de sequência zero.

Figura 20 - Circuito equivalente de transformadores que filtram a componente de sequência zero.



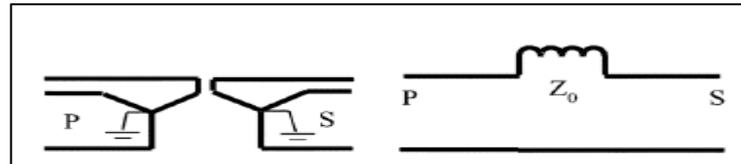
Fonte:(MELO J., 2022).

Figura 21 - Circuito equivalente de transformadores que introduz o desfasamento angular.



Fonte:(MELO J., 2022).

Figura 22 - Circuito equivalente de transformadores que não modificam o afundamento de tensão



Fonte:(MELO J., 2022).

A classificação do grupo dos três transformadores citados anteriormente, pode ser descritos matematicamente por meio de matrizes de transformação T_1 , T_2 e T_3 , respectivamente:

$$T_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad (3.37)$$

$$T_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

A Tabela 4 demonstra o resultado da passagem de cada tipo de afundamento de tensão pelos três grupos de transformadores trifásicos (Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3).

Tabela 4 - Propagação de afundamentos de tensão por transformadores trifásicos.

Conexão dos Transformadores	Tipo do Afundamento de Tensão						
	Tipo A	Tipo B	Tipo C	Tipo D	Tipo E	Tipo F	Tipo G
YNyn	A	B	C	D	E	F	G
Yy, Dd, Dz	A	D*	C	D	G	F	G
Yd, Dy, Yz	A	C*	D	C	F	G	F

Fonte:(BOLLEN, 2000).

3.4.1 Transferência de uma VTCD através dos tipos de transformadores

De forma a obter uma visão geral dos afundamentos resultantes, serão abordadas de forma sistemática abaixo as diferentes combinações dos afundamentos de tensão, ocasionados por falta monofásica e bifásica, que podem ser aplicados nos três tipos de transformadores.

3.4.1.1 Falta monofásica, carga conectada em estrela e sem transformador

Este tipo de falta resulta nas e equações 3.12, 3.13 e 3.14, como observado anteriormente. Esse tipo de afundamento de tensão será identificado por X1.

3.4.1.2 Falta monofásica, carga conectada em Delta e sem transformador

Este tipo de falta resulta nas e equações 3.15, 3.16 e 3.17, como observado anteriormente. Esse tipo de afundamento de tensão será identificado por X2.

3.4.1.3 Falta monofásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 2

O transformador T_2 remove a componente de sequência zero da tensão, com isso obtemos:

$$\vec{V}_a = \frac{1}{3} + \frac{2}{3}h \quad (3.39)$$

$$\vec{V}_b = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}h - \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (3.40)$$

$$\vec{V}_c = -\frac{1}{6} - \frac{1}{3}h + \frac{1}{2}j\sqrt{3} \quad (3.41)$$

Esse tipo de afundamento de tensão será identificado por X3

3.4.1.4 Falta monofásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 2

As tensões medidas fase-fase em uma carga conectada em delta não contêm nenhuma componente de sequência zero, portanto o transformador tipo 2 não tem influência sobre as tensões no afundamento de tensão. Esse tipo de afundamento ainda pode ser caracterizado por X2.

3.4.1.5 Falta monofásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 3

O transformador tipo 3 transforma as tensões de fase em tensões de linha. Conseqüentemente, uma carga conectada em estrela no lado do secundário sofre a mesma queda de tensão que uma carga conectada em delta no lado primário. Nesse caso esse tipo de afundamento é caracterizado por X2.

3.4.1.6 Falta monofásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 3

Nesse caso, há duas transformações envolvidas: da carga conectada em estrela para a carga conectada em delta e do lado primário para o lado secundário do transformador. Cada uma dessas transformações pode ser descrita por meio da matriz

T_3 , a qual foi definida pela equação (3.38). Duas dessas transformações em cascata têm o mesmo efeito que a transformação T_2 . Dessa forma, a queda de tensão experimentada por uma carga conectada em delta é a mesma que a carga conectada em estrela atrás de um transformador do tipo 2, resultando em um afundamento de tensão do tipo X3.

3.4.1.7 Falta bifásica, carga conectada em Estrela e sem transformador

Este tipo de falta resulta nas equações 3.24, 3.25 e 3.26, como observado anteriormente. Esse tipo de afundamento de tensão será identificado por X4.

3.4.1.8 Falta bifásica, carga conectada em Delta e sem transformador

Este tipo de falta resulta nas equações 3.27, 3.28 e 3.29, como observado anteriormente. Esse tipo de afundamento de tensão será identificado por X5.

3.4.1.9 Falta bifásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 2

Como as faltas bifásicas não resultam em nenhuma tensão de sequência zero, o transformador tipo 2 não apresenta efeito, já que o mesmo remove a tensão de sequência zero. Assim, o afundamento de tensão permanece o tipo X4.

3.4.1.10 Falta bifásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 2

Como as faltas bifásicas não resultam em nenhuma tensão de sequência zero, o transformador tipo 2 não apresenta efeito, já que o mesmo remove a tensão de sequência zero. Assim, o afundamento de tensão permanece o tipo X5.

3.4.1.11 Falta bifásica, carga conectada em Estrela e transformador tipo 3

A carga com conexão em estrela no secundário de um transformador tipo 2 experimenta uma queda de tensão equivalente à de uma carga conectada em delta no lado do primário do transformador. Portanto isso resulta no afundamento de tensão tipo X5.

3.4.1.12 *Falta bifásica, carga conectada em Delta e transformador tipo 3*

Esse conjunto de fatores leva a uma transformação T_3 , em cascata, resultando em uma transformação T_2 . No entanto, a transformação T_2 só remove o componente de sequência zero, com isso não tem efeitos sobre os afundamentos de tensão originados por faltas bifásicas. portanto isso resulta no afundamento de tensão tipo X4.

4 ESTUDOS DE CASO

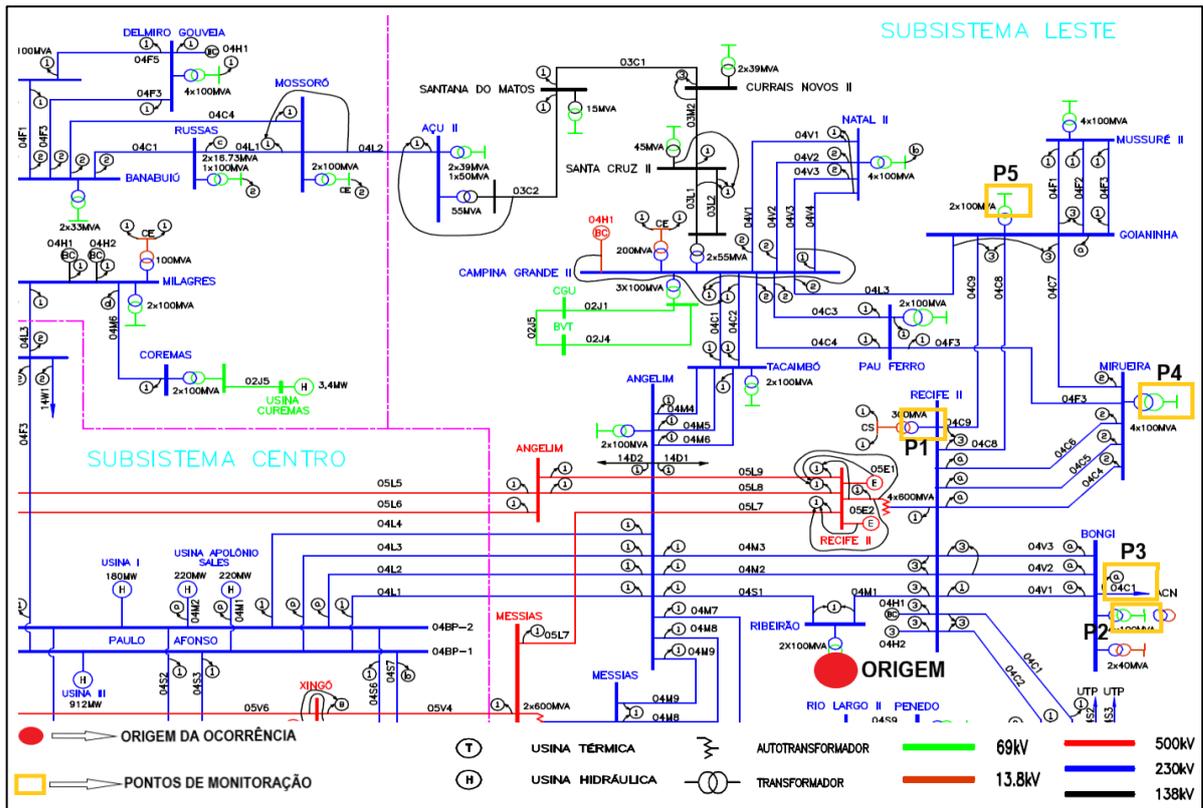
Neste capítulo analisaremos três tipos de eventos de faltas, cujos casos ocorreram no sistema de transmissão da Chesf, com o objetivo de verificar a propagação das VTCDs com relação às suas severidades em níveis mais elevados ou mais baixos que a tensão de ocorrência na rede de transmissão. Neste sentido, analisaremos uma ocorrência em cada nível de tensão 69kV, 230kV e 500kV.

4.1 Caso I (Ocorrência no 69kV- Grau de Severidade 2)

Esta ocorrência ocorreu no dia 28/04/2001 às 16h35min25s no subsistema leste da Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), na linha de transmissão de 69 kV da subestação Ribeirão, causado por uma queimada.

A ocorrência do Caso I, que foi classificado com grau de severidade 2 (magnitude 0,54p.u), de acordo com a faixa de magnitude da tabela da Figura 5, resultou em registros de afundamentos de tensão em cinco pontos de monitoração, os quais podem ser observados no mapa da Figura 23, nos terminais RCD-04T5 (P1 / 230kV), BGI-04T4(CI) (P2 / 69kV), BGI-04C1 (P3 / 230kV), MRR-04T2 (P4 / 69kV) e GNN-02M2 (P5 / 69kV). Os pontos de monitoração estão destacados no mapa da Figura 23 com a cor amarela, e a origem da ocorrência, destacada com a cor vermelha.

Figura 23 - Mapa Chesf Caso I.



Fonte: Chesf

Com base na análise dos registros nos pontos afetados pela ocorrência do Caso I, foi possível classificar as VTCDs com grau de severidade 0 (zero) de acordo com a faixa de magnitude da tabela da Figura 5. Cada ponto de medição indicado no mapa da Figura 23 é apresentado na Tabela 5 com a identificação do seu subsistema, ponto de medição, nível de tensão, afundamento e grau de severidade.

Tabela 5 - Estudo do Caso I: 69kV – Grau de Severidade 2 (magnitude 0,54p.u).

Indicação no mapa	P1	P2	P3	P4	P5
Subsistema	Leste	Leste	Leste	Leste	Leste
Ponto de Medição	RCD-04T5	BGI-04T4	BGI-04C1	MRR-04T2	GNN-02M2
Nível De Tensão (kV)	230	69	230	69	69
Afundamento (p.u)	0,91	0,87	0,83	0,88	0,92
Grau de Severidade	0	0	0	0	0

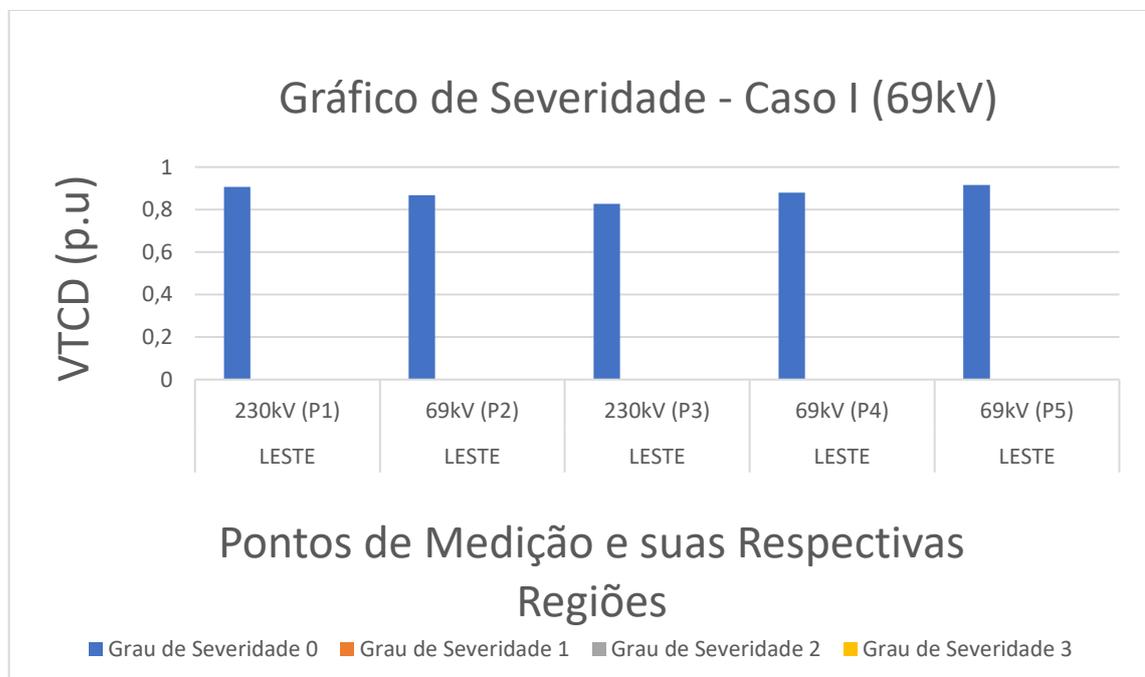
Fonte: (Próprio Autor)

Analisando o Caso I, cuja ocorrência se deu no 69kV com grau de severidade 2 (dois), a VTCD se propagou nos níveis de tensão 69kV e 230kV, porém com grau de severidade 0 (zero).

4.1.1 Análise da Propagação da Severidade do Caso I (69kV – Grau de Severidade 2)

Observando o gráfico da Figura 24, os pontos de monitoração P1 e P3, que se localizam no nível de tensão de 230kV, tiveram os valores de afundamentos de tensão 0,9p.u e 0,83p.u, respectivamente, classificados com grau de severidade 0 (zero) e localizados na mesma região da ocorrência, aqui pode-se observar que ele se propagou para o nível de tensão 230kV. Com esses registros é possível observar que a propagação ocorreu até o nível de tensão de 230kV. No entanto, os níveis de afundamento foram muito baixos, pois a propagação se limitou ao lado de 230kV do transformador, sem ir além disso.

Figura 24 - Gráfico de Severidade do Caso I: 69kV – Grau de Severidade 2 (magnitude 0,54p.u)



Fonte: (Próprio Autor).

Os pontos P2, P4 e P5, que possuem níveis de tensão 69kV, tiveram os valores de afundamentos de tensão 0,87p.u, 0,88p.u e 0,92p.u, respectivamente, classificados com grau de severidade 0 (zero) de acordo com a faixa de magnitude da tabela da Figura 5 e localizada na mesma região de ocorrência.

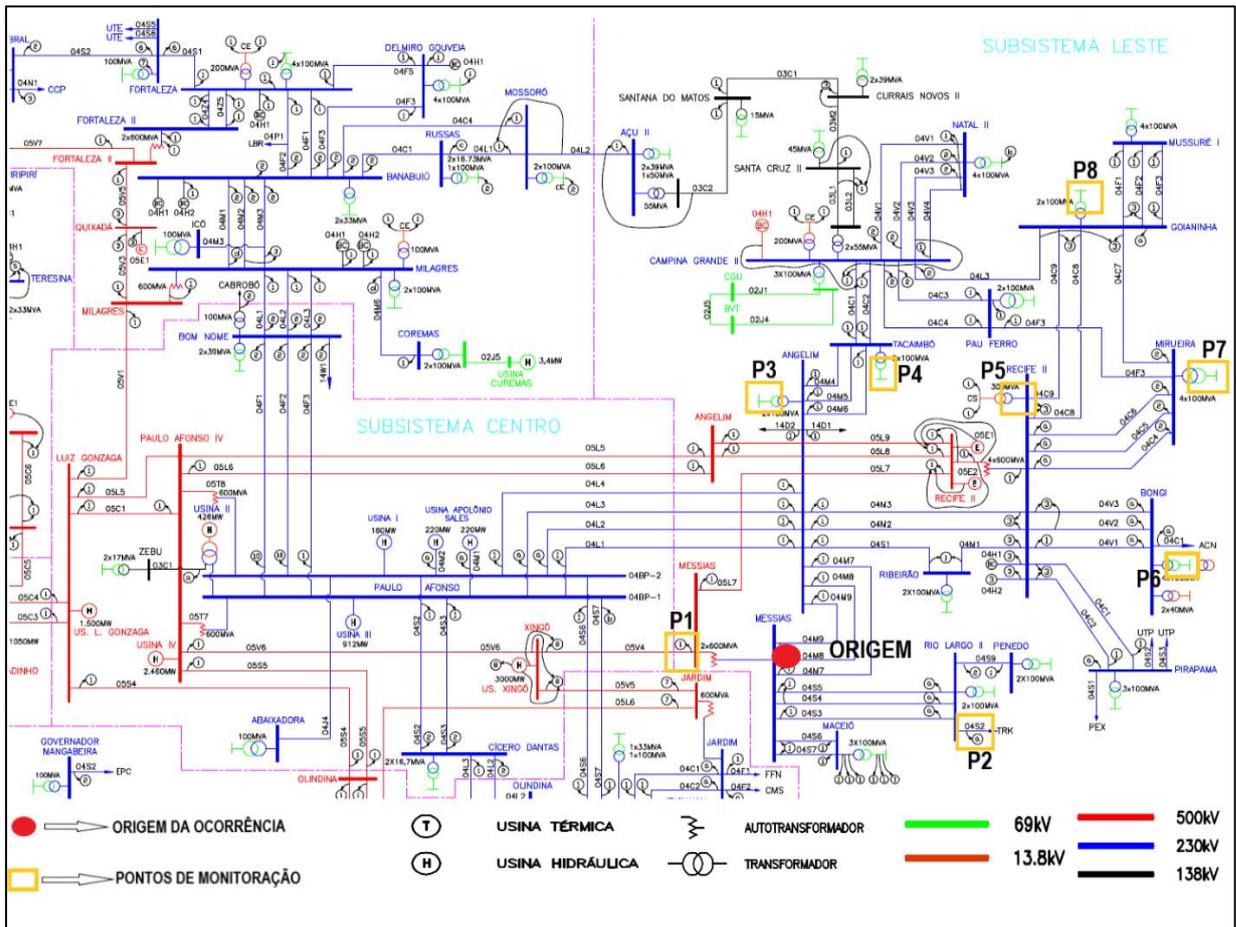
4.2 Caso II (Ocorrência no 230kV – Grau de Severidade 2)

Esta ocorrência ocorreu no dia 31/01/2001 às 15h42min46s no subsistema leste da Chesf, no barramento MSI-04M8 na linha de 230kV em Alagoas, causado por uma queimada e classificado com grau de severidade 2 (magnitude 0,44p.u) de acordo com a faixa de magnitude da tabela da Figura 5.

Os dados foram registrados em 8 (oito) pontos nos terminais: MSI-05V4 (P1 / 500kV), RLD-04S2 (P2 / 230kV), ALG-04T5 (P3 / 69kV), TAC-04T2 (P4 / 69kV), RCD-04T5 (P5 / 230kV), BGI-04T2 (P6 / 69kV), MRR-04T2 (P7 / 69kV) e GNN-02M2 (P8 / 69kV).

Os pontos de monitoração estão destacados no mapa da Figura 25 com a cor amarela, e a origem da ocorrência, destacada com a cor vermelha.

Figura 25 - Mapa Chesf Caso II



Fonte: Chesf

Com base na análise realizada, pode-se verificar que houve registro de afundamentos de tensão em diferentes níveis de tensão. Cada ponto de medição indicado no Mapa da Figura 25 é apresentado na Tabela 6 com a identificação do seu subsistema, ponto de medição, nível de tensão, afundamento e grau de severidade. Os resultados indicaram que houve três casos com grau de severidade 1 (um) e cinco casos com grau de severidade 0 (zero), de acordo com a tabela da Figura 5.

Tabela 6 - Estudo do Caso II: 230kV – Grau de Severidade 2 (magnitude 0,44p.u).

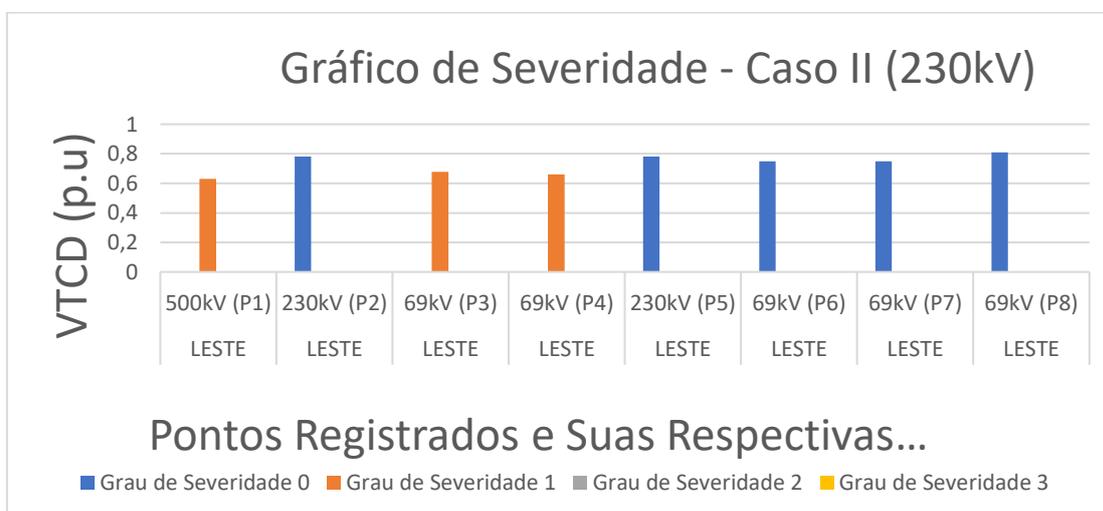
Indicação No Mapa	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Subsistema	Leste							
Ponto De Medição	MSI-05V4	RLD-04S2	ALG-04T5	TAC-04T2	RCD-04T5	BGI-04T2	MRR-04T2	GNN-02M2
Nível De Tensão (kV)	500	230	69	69	230	69	69	69
Afundamento (p.u)	0,62	0,78	0,68	0,66	0,78	0,75	0,75	0,81
Grau de Severidade	1	0	1	1	0	0	0	0

Fonte: (Próprio Autor).

4.2.1 Análise da Propagação da Severidade do Caso II (230kV – Grau de Severidade 2)

Analisando o Caso II, cuja ocorrência se deu no 230kV com grau de severidade 2 (dois), a VTCD se propagou nos níveis de tensão 69kV, 230kV e 500kV. Conforme mostrado no gráfico em barra da Figura 26. Observando o mapa da Figura 25, O ponto P1 está localizado no lado de alta tensão do autotransformador (500kV), cuja ocorrência se deu no lado de baixa tensão (230kV), por esta razão o ponto P1 se destacou dos demais pontos registrados, com relação a VTCD, ao apresentar o maior valor de 0,62 p.u.

Figura 26 - Gráfico de Severidade do Caso II: 230kV - Grau de Severidade 2 (magnitude 0,44p.u)



Fonte: (Próprio Autor).

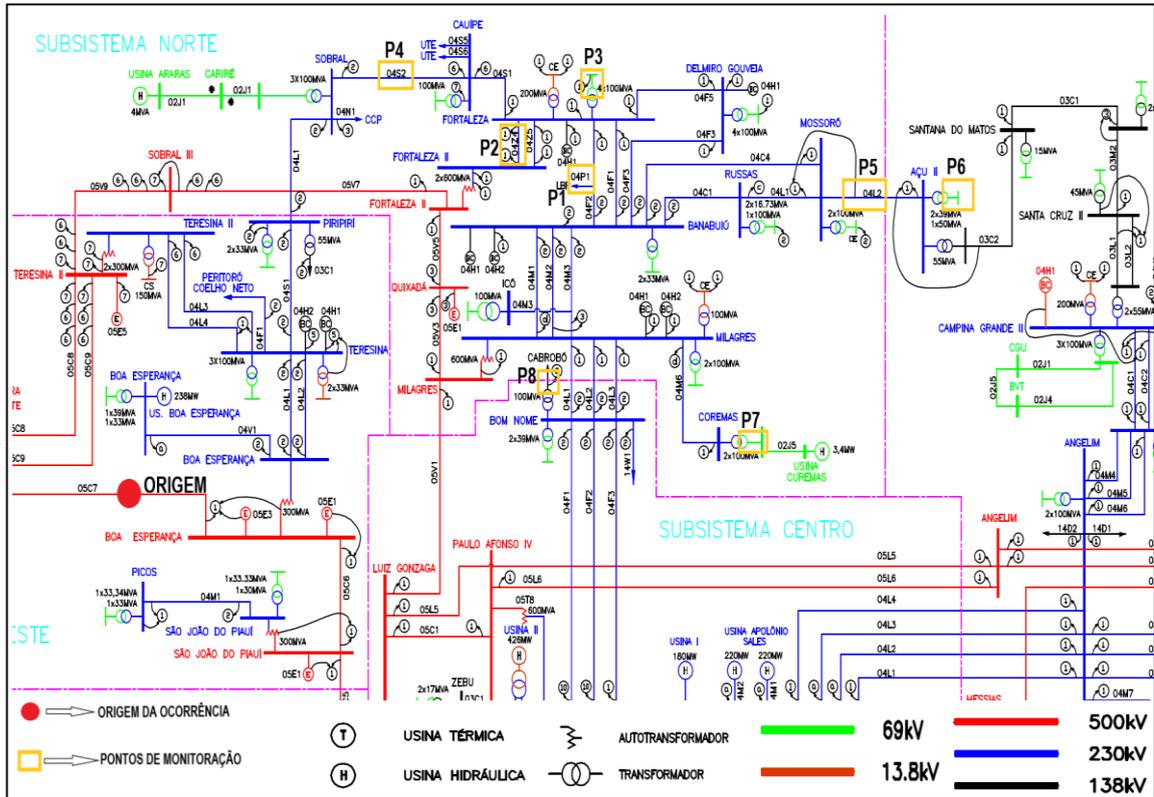
Observando os pontos P3 (0,68p.u) e P4 (0,66p.u), que estão próximo ao barramento MSI-04M8 da linha 230kV, verificou-se que estes pontos apresentaram o grau de severidade 1 (um), como pode ser observado no gráfico da Figura 26. Por outro lado, o pontos de monitoração P6 (0,75p.u), P7 (0,75p.u), P2 (0,78p.u), P5 (0,78p.u) e P8 (0,81p.u), que se encontram nos níveis de tensão 69kV e 230kV, estão mais distantes do local da ocorrência e, portanto, apresentaram grau de severidade 0 (zero).

4.3 Caso III (Ocorrência no 500kV – Grau de Severidade 3)

Esta ocorrência ocorreu no dia 07/03/2001 às 18h57min06s no subsistema oeste da Chesf, causado por uma descarga atmosférica no barramento BEA-05C7 no 500kV, classificado com grau de severidade 3 (magnitude 0,24p.u) conforme a magnitude mostrada na tabela da Figura 5.

A ocorrência provocou uma variação de tensão ao longo do sistema de transmissão, cujo os registros se deu em oito pontos: FTZ-04P1(CI) (P1 / 230kV), FTZ-04Z4 (P2 / 230kV), FTZ-04T2 (P3 / 69kV), SBD-04S1 (P4 / 230kV), MSD-04L2 (P5 / 230kV), ACD-02F3 (P6 / 69kV), CMA-04T1 (P7 / 69kV), BNO-03C2 (P8 / 138kV). Os pontos de monitoração estão destacados no mapa da Figura 27 com a cor amarela, e a origem da ocorrência, destacada com a cor vermelha.

Figura 27 - Mapa Chesf Caso III



Fonte: Chesf

Analisando a Tabela 7, pode-se observar que foram registrados casos de VTCDs em diversas linhas de nível de tensão diferente, atingindo todas as tensões de linhas possíveis no sistema de transmissão da Chesf.

Tabela 7 - Estudo do Caso III: 500kV – Grau de Severidade 3 (magnitude 0,24p.u).

Indicação No Mapa	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
Subsistema	Norte	Norte	Norte	Norte	Norte	Leste	Norte	Centro
Ponto De Medição	FTZ-04P1 (CI)	FTZ-04Z4	FTZ-04T2	SBD-04S1	MSD-04L2	ACD-02F3	CMA-04T1	BNO-03C2
Nível De Tensão (kV)	230	230	69	230	230	69	69	138
Afundamento (p.u)	0,32	0,33	0,35	0,5	0,58	0,67	0,77	0,85
Grau de Severidade	3	3	3	2	2	1	1	0

Fonte: (Próprio Autor)

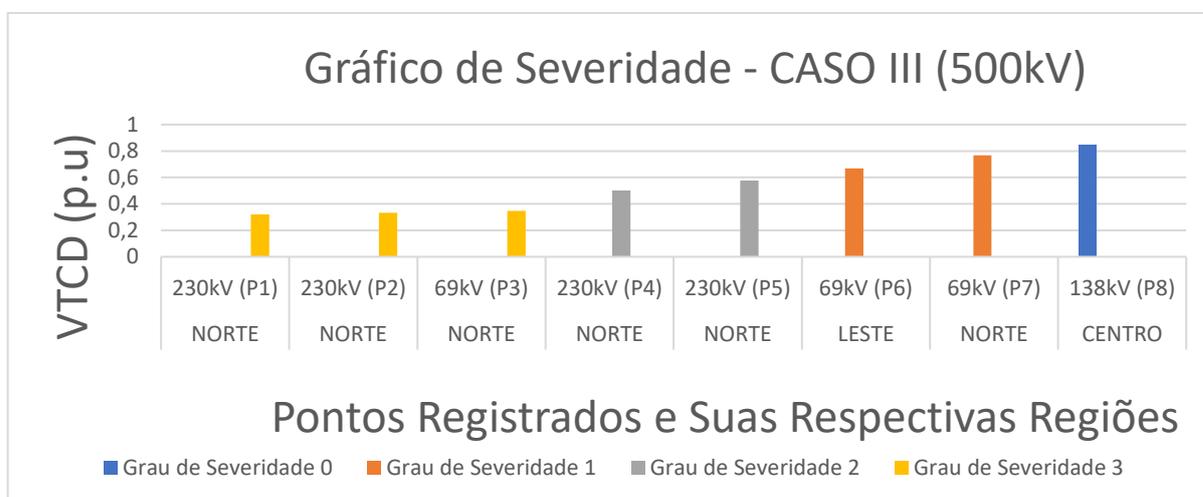
Foram registrados três casos com grau de severidade 3 (três) em linhas de 230kV e 69kV. Além disso, foram registrados dois casos com grau de severidade 2 (dois) em linhas de 230kV, também foram registrados dois casos com grau de severidade 1 (um) em linhas de 69kV e um caso com grau de severidade 0 (zero) em uma linha de 138kV

4.3.1 Análise da Propagação da Severidade do Caso III (500kV – Grau de Severidade 3)

Ao analisar os pontos P1 (0,32p.u), P2 (0,33p.u) e P3 (0,35p.u) no mapa fornecido, perceber-se que estes estão localizados próximos ao barramento BEA-05C7 na linha de 500kV, onde ocorreu a descarga atmosférica responsável pelo evento. Como resultado, esses pontos tiveram o maior grau de severidade, podendo notar pelo gráfico da Figura 28 a diferença com relação aos demais. Por outro lado, os pontos P6 (0,67p.u), P7 (0,77p.u) e P8 (0,85p.u) estão localizados mais afastados do barramento e, portanto, tiveram um grau de severidade menor que os outros pontos.

Pode-se observar que nessa ocorrência a região atingida foi maior, passando por quatro regiões, incluindo a sua região de origem (oeste, norte, leste e centro) e atingindo diversos níveis de tensão (69kV, 138kV, 230kV) no sistema.

Figura 28 - Gráfico de Severidade do Caso III: 500kV - Grau de Severidade 3 (magnitude 0,24p.u).



Fonte: (Próprio Autor)

4.4 Análise da Propagação dos Casos

No caso I analisado, ocorrido na linha de transmissão de 69 kV, foi registrado cinco pontos de VTCDs na mesma região da ocorrência. No presente caso, constata-se que os níveis das VTCDs nos pontos monitorados não alcançaram patamares relevantes, resultando em uma limitada área de abrangência que se estendeu apenas aos pontos imediatamente adjacentes à sua origem, mantendo-se o grau de severidade 0 (zero). A região de ocorrência do Caso I foi relativamente curta comparada com as regiões de ocorrência dos Caso II e III, não saindo da região Leste que é a sua origem, como se pode notar na Tabela 8 que mostra os piores graus de severidade nos níveis de propagação e subsistemas dos Casos I, II e III.

Tabela 8 - Tabela de Propagação

Nível de Propagação	Subsistema	Caso I (69kV-Leste) Grau de Severidade 2 (VTCD: 0,54p.u)		Caso II (230kV-Leste) Grau de Severidade 2 (VTCD: 0,44p.u)		Caso III (500kV-Leste) Grau de Severidade 3 (VTCD: 0,24p.u)	
		Severidade	VTCD (p.u)	Severidade	VTCD (p.u)	Severidade	VTCD (p.u)
500kV	Leste			1	0,63 (P1)		
	Norte						
	Centro						
	Oeste						
230kV	Leste	0	0,83 (P3)	0	0,78 (P2/P3)		
	Norte					3	0,32 (P1)
	Centro						
	Oeste						
138kV	Leste						
	Norte						
	Centro					0	0,85 (P8)
	Oeste						
69kV	Leste	0	0,87 (P2)	1	0,66 (P4)		
	Norte					3	0,35 (P6)
	Centro						
	Oeste						

Fonte: (Próprio Autor)

No Caso II, ocorrido na linha de transmissão de 230 kV, foi registrado oito pontos de VTCDs na região de ocorrência, que atingiram o grau de severidade 1 (um) em três dos oito pontos. A ocorrência do segundo caso teve uma região um pouco maior em comparação com o primeiro. Ao examinar a Tabela 8, constata-se que a ocorrência do Caso II conseguiu se propagar em três níveis de tensão distintos 69kV, 230kV e 500kV. Vale ressaltar que o nível de 500kV foi atingido pelo fato de estar no barramento de alta do transformador cuja ocorrência se deu no barramento de baixa (230kV), sendo o mais próximo da origem da ocorrência. Entretanto, a propagação dessa ocorrência não ultrapassou a região do subsistema de origem (leste).

No Caso III, ocorrido na linha de transmissão de 500 kV, a análise da Tabela 8 revela uma extensiva área de propagação da ocorrência, com os níveis de propagação alcançando valores de 69kV, 138kV e 230kV. Além disso, foram detectados três pontos, todos com grau de severidade 3, representando a classificação mais alta em comparação aos demais casos analisados. Tais pontos foram identificados nas tensões de 69kV e 230kV, sendo dois localizados na região norte.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusão

A análise dos casos de VTCDs ocorridos em diferentes níveis de tensão revela que a propagação dessas ocorrências é influenciada pelo nível de tensão em que ocorrem. No Caso I, em que a VTCD ocorreu em uma linha de transmissão de 69 kV, a região de propagação do evento foi limitada, restringindo-se apenas aos pontos próximos à origem da queimada. No Caso II a região de propagação foi um pouco mais ampla, mas não saindo da região de origem da Ocorrência. No Caso III em que a VTCD ocorreu em uma linha de transmissão de 500 kV, a propagação do evento foi mais ampla, atingindo quatro regiões diferentes em níveis de tensões distintos, apresentando além disso maior grau de severidade dos pontos de monitoração.

Quando a VTCD ocorre em níveis mais baixos de tensão, o número de circuitos que são atingidos por um afundamento de tensão é limitado, o que significa que o impacto é menor. Por outro lado, quando a VTCD ocorre em níveis mais altos de tensão, o número de circuitos elétricos que detectam o afundamento de tensão é maior e se estende geograficamente, resultando em maior impacto.

5.2 Recomendações

A implementação de medidas preventivas e corretivas é fundamental para minimizar os impactos das VTCDs na rede elétrica e nos consumidores afetados. Dentre essas medidas, destaca-se a manutenção adequada das linhas de transmissão, que deve ser realizada regularmente para garantir o bom funcionamento dos equipamentos e a detecção precoce de possíveis falhas. Além disso, a adoção de sistemas de proteção, como relés de proteção, dispositivos de seccionamento e aterramento, também é importante para minimizar os efeitos das VTCDs na rede elétrica. Esses sistemas podem detectar rapidamente a ocorrência de uma VTCD e interromper o fornecimento de energia elétrica nas regiões afetadas, evitando danos mais graves aos equipamentos e à população.

Esses sistemas podem detectar rapidamente a ocorrência de uma VTCD e interromper o fornecimento de energia elétrica nas regiões afetadas, evitando danos mais graves aos equipamentos e à população. Por fim, é fundamental que as empresas do setor elétrico estejam preparadas para lidar com situações de emergência, mantendo equipes de prontidão e planos de contingência bem estruturados, para que possam agir de forma rápida e eficiente na recuperação do sistema elétrico em caso de ocorrência de curto-circuito.

REFERÊNCIAS

BOLLEN, M. H.; ABBASZADEH, M. **Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions**. New York: IEEE Press, 2000.

EPRI, Voltage Sag and Interruption Sensitivity Study. Washington DC (1995).

FERNADES, Robson de Matos. **ANÁLISE DE MEDIDAS OPERATIVAS PARA CONTROLE DE HARMÔNICOS NA REDE ELÉTRICA: um estudo de caso**. 2007. 159 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Ufrj, Rio de Janeiro, 2007.

Chesf (Companhia Hidroelétrica de São Francisco). Diagrama esquemático do sistema de transmissão da Chesf.

FOLHA DE SÃO PAULO. **Problemas na energia são sinais de alerta para o Brasil**. (2022).

LEITÃO, J. J. A. L., Siqueira, I. P. de, Lira, M. M. da S., & Ribeiro, P. F. (2004). **Avaliação de Índices de Qualidade de Energia na Rede de Transmissão no Nordeste do Brasil**.

MELO J., Álvaro J.; SILVA, Francisco E. M.; MARTINS, Luís L. P.; GOMES, gTayná M. A.; LEÃO, Ruth P. S. **Desenvolvimento de Aplicativo para Estudo de Propagação de Afundamentos de Tensão com Base na IEEE Std 1668-2017**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 10., 2022, Recife.

TAVARES, Vladimir Sanches da Costa. **Amostragem da Qualidade de Energia Elétrica: estudo da qualidade de energia na cidade da Praia & na Ilha de Boavista**. 2015. 131 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Unicv/Dct, Praia Santiago Cv, 2015.

ONS. Submódulo 9.7, **Indicadores de Qualidade de Energia**. 2020.12. Disponível em: <<https://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>>.