

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Vitor Saldanha Salengue

**Análise da evolução nos níveis de curto-circuito e superação de disjuntores nos barramentos do Sistema Interligado Nacional decorrentes à entrada em operação de um novo empreendimento de transmissão**

Florianópolis

2021

Vitor Saldanha Salengue

**Análise da evolução nos níveis de curto-circuito e superação de disjuntores nos barramentos do Sistema Interligado Nacional decorrentes à entrada em operação de um novo empreendimento de transmissão**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph. D.  
Coorientadora: Eng<sup>a</sup> Júlia Xavier Magno Nunes.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,  
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Salengue, Vitor Saldanha

Análise da evolução nos níveis de curto-circuito e  
superação de disjuntores nos barramentos do Sistema  
Interligado Nacional decorrentes à entrada em operação de um  
novo empreendimento de transmissão / Vitor Saldanha  
Salengue ; orientador, Mauro Augusto da Rosa,  
coorientadora, Júlia Xavier Magno Nunes, 2021.  
99 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Estudos de curto-circuito.  
3. Superação de disjuntores. 4. Evolução nos níveis de curto  
circuito. 5. Componentes simétricas. I. Rosa, Mauro  
Augusto da. II. Nunes, Júlia Xavier Magno. III.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em  
Engenharia Elétrica. IV. Título.

Vitor Saldanha Salengue

**Título: Análise da evolução nos níveis de curto-circuito e superação de disjuntores nos barramentos do Sistema Interligado Nacional decorrentes à entrada em operação de um novo empreendimento de transmissão**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 20 de Maio de 2021.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Mauro Augusto da Rosa, Ph. D.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng<sup>a</sup> Júlia Xavier Magno Nunes.

Coorientadora

---

Prof. Miguel Moreto, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Diego Issicaba, Ph. D.

Universidade Federal de Santa Catarina

---

Eng<sup>o</sup> Gabriel Santos Bolacell, MSc.

PPGEEL - Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus familiares, amigos e colegas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Ricardo e Nórís, e ao meu irmão Felipe, por todo apoio e estrutura que me proporcionaram durante toda a graduação.

Agradeço a todos os professores com tive o prazer de aprender durante toda a graduação, em especial ao meu orientador Professor Mauro Augusto da Rosa que se fez disposto a esclarecer minhas dúvidas e teve participação direta no presente trabalho.

Agradeço especialmente a minha coorientadora, Eng<sup>a</sup> Julia Xavier Magno Nunes, pela imensa ajuda e disponibilidade durante todo o processo de confecção deste trabalho, e a atenção aos menores detalhes, fazendo este trabalho mais completo e conciso.

Agradeço aos supervisores que tive durante meus estágios Edemílson, Jairo e André, por todo ensinamento que me foi repassado, assim como o exemplo de profissionalismo e dedicação.

Agradeço aos amigos e amigas, com quem compartilhei momentos especiais e me apoiaram durante todos esses anos.

“A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimento. É uma forma de pensar. E isso é fundamental para seu sucesso [...]. Ela funciona. É uma ferramenta essencial para uma democracia numa era de mudança.”

(Carl Sagan, 1990)

## RESUMO

Este trabalho apresenta estudos realizados com o objetivo de analisar as evoluções nos níveis de curto-circuito dos barramentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) que a implantação de novos empreendimentos de transmissão pode causar, assim como analisar se existe superação de disjuntores por conta dessas evoluções. São mostradas as metodologias, utilizadas pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) e pelos agentes de transmissão do sistema elétrico brasileiro, para análise de superação de disjuntores devido à corrente de curto-circuito simétrica, assim como os critérios que norteiam as análises de evolução nos níveis de curto-circuito decorrentes à entrada em operação dos novos empreendimentos. É apresentado um estudo de curto-circuito que avalia o impacto que uma subestação específica causa no Sistema Interligado Nacional, seguindo os critérios citados acima.

**Palavras-chave:** Curto-circuito. Sistema Interligado Nacional. Empreendimentos de transmissão. Superação. Disjuntores. Evolução.



## ABSTRACT

This work presents studies made in order to analyze the evolutions in short-circuit levels of the buses of the National Interconnected System (SIN) that the implementation of new transmission facilities can cause, as well as to analyze if there is overrating of circuit breakers due to these evolutions. The methodologies used by the National System Operator (ONS) and by the transmission agents of the Brazilian electrical system for analysis of overrating of circuit breakers due to the symmetrical short-circuit current, as well as the criteria that guide the evolution analyzes in the short-circuit levels resulting from the implantation of new undertakings are shown. A short-circuit study that assesses the impact that a specific transmission undertaking causes on the National Interconnected System is presented, following the criteria mentioned above.

**Keywords:** Short-circuit. National Interconnected System. Transmission Undertaking. Overrating. Circuit-breakers. Evolution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Máquina síncrona sujeita a falta trifásica.....	20
Figura 2 – Forma de onda da corrente de curto-circuito.....	21
Figura 3 – Forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica.....	22
Figura 4 – Sequência positiva.....	26
Figura 5 – Sequência negativa real.....	27
Figura 6 – Sequência negativa modificada.....	28
Figura 7 – Sequência zero.....	29
Figura 8 – Carga ligada em Y aterrado.....	31
Figura 9 – Gerador síncrono em Y aterrado.....	32
Figura 10 – Gerador síncrono no domínio da sequência.....	33
Figura 11 – Ligações de transformadores e suas respectivas modelagens em sequência zero.....	34
Figura 12 – Falta trifásica em um gerador síncrono.....	36
Figura 13 – Conexão dos circuitos de sequência do gerador síncrono na falta trifásica.....	37
Figura 14 – Falta fase-terra no gerador síncrono.....	38
Figura 15 – Conexão dos circuitos de sequência do gerador síncrono na falta fase-terra.....	39
Figura 16 – Falta fase-fase no gerador síncrono.....	40
Figura 17 – Conexão dos circuitos de sequência do gerador síncrono na falta fase-fase.....	41
Figura 18 – Falta fase-fase-terra no gerador síncrono.....	42
Figura 19 – Conexão dos circuitos de sequência do gerador síncrono na falta fase-fase-terra.....	43
Figura 20 – Diagrama de um curto-circuito monofásico.....	44
Figura 21 – Modelo de sequência em uma falta monofásica no sistema.....	44
Figura 22 – Diagrama de um curto-circuito trifásico.....	45
Figura 23 – Modelo de sequência positiva em uma falta trifásica no sistema.....	45
Figura 24 – Diagrama de um curto-circuito fase-fase.....	46
Figura 25 – Modelo de sequência em uma falta fase-fase no sistema.....	46
Figura 26 – Diagrama de um curto-circuito fase-fase-terra.....	47
Figura 27 – Modelo de sequência em uma falta fase-fase-terra no sistema.....	47
Figura 28 – Representação de uma falta no barramento.....	56
Figura 29 – Representação de uma falta na saída de linha.....	57
Figura 30 – Representação de uma falta na saída de linha com o terminal remoto aberto.....	58
Figura 31 – Representação da SE Tubarão Sul.....	68

Figura 32 – Fragmento 1 do código que insere a SE Tubarão Sul no caso BR2012A.....	70
Figura 33 – Fragmento 2 do código que insere a SE Tubarão Sul no caso BR2012A.....	71
Figura 34 – Carregar caso base no ANAFAS. ....	72
Figura 35 – Carregar alterações no ANAFAS.....	73
Figura 36 – Opção “Evolução de Níveis de Curto-Circuito” no ANAFAS.....	74
Figura 37 – “Evolução de Níveis de Curto-Circuito” no ANAFAS - Configuração. ....	74
Figura 38 - Esquemático dos barramentos 69 kV e 138 kV de Jorge Lacerda A.....	78
Figura 39 – Opção “Superação de Disjuntores” no ANAFAS.....	79

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 69 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul. ....	79
Quadro 2 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 138 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul. ....	80
Quadro 3 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 69 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul + SE Siderópolis 2. ....	82
Quadro 4 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 138 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul + SE Siderópolis 2. ....	83

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais origens de perturbação no sistema elétrico brasileiro.....	18
Tabela 2 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN antes da entrada em operação da SE Tubarão Sul.....	75
Tabela 3 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN após a entrada em operação da SE Tubarão Sul.....	76
Tabela 4 – Variação nos níveis de curto-circuito. ....	77
Tabela 5 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN após a entrada em operação da SE Tubarão Sul em conjunto com parte da SE Siderópolis 2. ....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
2F	Curto-Circuito Bifásico
1F	Curto-Circuito Monofásico
3F	Curto-Circuito Trifásico
DIT	Demais Instalações de Transmissão
DJ	Disjuntor
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAR	Plano de Ampliação e Reforços
PD	Plano Decenal
PELP	Plano de Expansão de Longo Prazo
PET	Programa de Expansão da Transmissão
RLC	Reatores Limitadores de Corrente
SIN	Sistema Interligado Nacional
SE	Subestação
TR	Transformador
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória
TC	Transformador de Corrente

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\theta$	Ângulo do fasor [°]
$I_{cn}$	Capacidade de interrupção simétrica [A]
$I_{cc}$	Corrente de curto-circuito [A]
$\hat{V}$	Fasor de tensão [V]
$\hat{i}$	Fasor de corrente [A]
$Z$	Impedância [ $\Omega$ ]
$\hat{a}$	Operador rotacional
$\omega$	Velocidade angular [rad/s]

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	OBJETIVOS .....	16
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivo geral.....</b>	<b>16</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Objetivos específicos.....</b>	<b>16</b>
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	CURTO-CIRCUITO.....	18
2.2	MÁQUINA SÍNCRONA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO .....	19
2.3	COMPONENTES SIMÉTRICAS .....	23
<b>2.3.1</b>	<b>Sistema trifásico de sequência positiva .....</b>	<b>25</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Sistema trifásico de sequência negativa.....</b>	<b>27</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Sistema trifásico de sequência zero .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Expressão analítica do Teorema de Fortescue.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Corrente de sequência zero.....</b>	<b>31</b>
2.4	REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES NO DOMÍNIO DA SEQUÊNCIA.....	32
<b>2.4.1</b>	<b>Geradores síncronos .....</b>	<b>32</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Transformadores .....</b>	<b>33</b>
<b>2.4.3</b>	<b>Linhas de transmissão .....</b>	<b>34</b>
2.5	FALTAS ASSIMÉTRICAS NO GERADOR SÍNCRONO.....	35
<b>2.5.1</b>	<b>Curto-circuito trifásico no gerador síncrono .....</b>	<b>35</b>
<b>2.5.2</b>	<b>Curto-circuito fase-terra no gerador síncrono.....</b>	<b>38</b>
<b>2.5.3</b>	<b>Curto-circuito fase-fase no gerador síncrono.....</b>	<b>39</b>
<b>2.5.4</b>	<b>Curto-circuito fase-fase-terra no gerador síncrono.....</b>	<b>41</b>
2.6	O CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA ELÉTRICO .....	43
<b>2.6.1</b>	<b>Curto-circuito monofásico no sistema .....</b>	<b>43</b>
<b>2.6.2</b>	<b>Curto-circuito trifásico no sistema.....</b>	<b>44</b>



<b>2.6.3</b>	<b>Curto-circuito fase-fase no sistema .....</b>	<b>45</b>
<b>2.6.4</b>	<b>Curto-circuito fase-fase-terra no sistema .....</b>	<b>46</b>
<b>2.7</b>	<b>DISJUNTORES .....</b>	<b>48</b>
<b>2.7.1</b>	<b>Classificação de disjuntores .....</b>	<b>48</b>
2.7.1.1	<i>Ar livre.....</i>	49
2.7.1.2	<i>Sopro magnético.....</i>	49
2.7.1.3	<i>Ar comprimido.....</i>	49
2.7.1.4	<i>Óleo.....</i>	49
2.7.1.5	<i>Vácuo.....</i>	50
2.7.1.6	<i>Hexafluoreto de Enxofre (SF6).....</i>	50
2.7.1.7	<i>Semicondutores.....</i>	50
<b>2.7.2</b>	<b>Capacidade de interrupção simétrica .....</b>	<b>50</b>
<b>2.7.3</b>	<b>Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT).....</b>	<b>51</b>
<b>3</b>	<b>SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES.....</b>	<b>52</b>
3.1	METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA .....	53
3.2	METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR TRT .....	54
3.3	METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CRISTA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO .....	54
3.4	METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CONSTANTE DE TEMPO X/R ...	55
3.5	METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO- CIRCUITO SIMÉTRICA.....	55
<b>4</b>	<b>ENTRADA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS E SEUS IMPACTOS NOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA NACIONAL INTERLIGADO.....</b>	<b>60</b>
4.1	A EPE NO PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO .....	61
4.2	ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO REFERENTES AO IMPACTO DA ENTRADA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS NO SIN .....	62
<b>4.2.1</b>	<b>Metodologia de estudos para análise de impactos nos níveis de curto-circuito</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>66</b>

5.1	DESCRIÇÃO DO CASO ANALISADO.....	66
5.2	PREMISSAS E CASO BASE .....	68
5.3	ALTERAÇÕES NO CASO BASE.....	69
5.4	SIMULAÇÃO DOS CASOS.....	73
5.5	SENSIBILIDADE À ENTRADA DE OUTROS EMPREENDIMENTOS.....	81
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES SOBRE O ESTUDO DE CASO.....	84
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>88</b>
	<b>APÊNDICE A – MATRIZES <math>Z_{barra}</math> E <math>Y_{barra}</math> PARA CÁLCULO COMPUTACIONAL DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO.....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE B – CÓDIGO NO EDITCEPEL QUE INSERE A SUBESTAÇÃO SIDERÓPOLIS 2.....</b>	<b>94</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por energia elétrica, tanto de consumidores residenciais quanto pelo crescimento do setor industrial e do comércio, exige a ampliação e recapacitação da matriz energética brasileira em todos seus segmentos, seja de geração, distribuição ou transmissão. Tais ampliações também podem ser realizadas para aumento de confiabilidade, visto que essa deve ser mantida elevada durante a expansão.

Como resultado desse crescimento, as correntes que fluem nos elementos do sistema elétrico se elevam e, da mesma forma, tem-se o aumento das correntes de curto-circuito, o que pode gerar superações indesejadas de equipamentos como disjuntores, linhas, transformadores e outros, diminuindo assim a confiabilidade do sistema como um todo. Logo, é indispensável que se conheçam as correntes de curto-circuito que podem fluir no sistema durante uma falha, suas evoluções e seus impactos. Para que se conheçam as correntes de curto-circuito, são feitos os chamados estudos de curto-circuito.

Durante a expansão do sistema elétrico brasileiro, com a entrada de novos empreendimentos de transmissão como subestações, seja por demanda de energia ou exigência de confiabilidade, é função do Operador Nacional do Sistema, o ONS, realizar estudos de curto-circuito que avaliam os impactos e as evoluções que tais empreendimentos podem causar nas correntes de curto-circuito, assim como avaliar se essas evoluções podem ser a causa da superação de algum disjuntor presente no sistema elétrico. Esse tipo de estudo elaborado pelo ONS deve seguir critérios que podem ser encontrados nos Procedimentos de Rede (ONS, 2021) elaborados pelo próprio ONS, em relação à evolução dos níveis de curto-circuito, e metodologias específicas para análise de superação de disjuntores.

Tendo em vista a existência desses critérios, metodologias e diretrizes que norteiam os estudos de curto-circuito, este trabalho tem o objetivo de apresentar tais critérios, metodologias e diretrizes, e dessa forma fazer uma análise completa do impacto que um empreendimento de transmissão pode ter sob o ponto de vista de correntes de curto-circuito e superação de disjuntores.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é apresentar um estudo de curto-circuito que analisa os impactos de um novo empreendimento no sistema elétrico brasileiro, a metodologia de análise de evolução nos níveis de curto-circuito nos barramentos do Sistema Interligado Nacional (SIN) além da análise de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica que esse empreendimento pode causar.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) Indicar a modelagem do sistema, utilizando componentes de sequência, para viabilização dos estudos sistêmicos usuais na situação de interesse, no objetivo geral.
- b) Apresentar metodologias para análise de superação de disjuntores, utilizadas em estudos sistêmicos, com foco na metodologia de superação por corrente de curto-circuito simétrica.
- c) Mostrar o papel do Operador Nacional do Sistema (ONS) no planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro, e apresentar algumas de suas funções sob ponto de vista de estudos sistêmicos, mais especificamente nos estudos de curto-circuito feitos para analisar o impacto da entrada de novos empreendimentos no Sistema Interligado Nacional (SIN).

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos. No capítulo 1, são apresentadas a introdução, os objetivos do trabalho, assim como a estrutura do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica a partir da qual este trabalho foi desenvolvido, sendo fundamental para a compreensão dos assuntos tratados aqui. São apresentadas as definições de curto-circuito, alternativamente denominado como “falta”, e algumas das importâncias dos estudos de curto-circuito para conhecimento das correntes ocasionadas em uma falta. Também são estudados conceitos de componentes simétricas, a

representação de componentes do sistema elétrico no domínio de sequência para estudos de curto-circuito, e então, é mostrado como é feito o cálculo das correntes de falta no sistema elétrico. Por fim, são apresentadas definições e algumas funções dos disjuntores das subestações do sistema.

No capítulo 3 são mostradas, de forma superficial, as metodologias para análise de superação de disjuntores pela constante de tempo  $X/R$ , TRT (Tensão de Restabelecimento Transitória), corrente de carga e corrente de crista e é dado um maior foco na metodologia para análise de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica, incluindo o estudo de corrente passante, estudo esse integrante da última metodologia citada.

O capítulo 4 expõe como é feito o processo de entrada de um novo empreendimento de transmissão, pontuando os papéis da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) no planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro e atribuições do Operador Nacional do Sistema (ONS) através dos estudos de curto-circuito referentes aos impactos causados pela implantação de novos empreendimentos no Sistema Interligado Nacional (SIN). Por fim é explicada a metodologia utilizada pelo ONS na elaboração dos estudos de curto-circuito para análise dos impactos causados pela entrada de um novo empreendimento de transmissão nos níveis de curto-circuito dos barramentos do Sistema Elétrico Brasileiro.

No capítulo 5 será realizado um estudo de caso, utilizando dados reais disponibilizados pelo ONS e pela EPE, onde é feita a análise de evolução nos níveis de curto-circuito e superação de disjuntores decorrentes à entrada em operação de um novo empreendimento de transmissão no SIN.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica do trabalho, contendo o embasamento teórico a partir do qual este trabalho foi desenvolvido.

### 2.1 CURTO-CIRCUITO

Os sistemas elétricos de potência podem ser violados por perturbações severas, que normalmente podem causar rupturas do isolamento entre fases ou entre fase e terra. Esse fenômeno é responsável pela ocorrência de curtos-circuitos, também conhecido como “faltas”. O fenômeno curto-circuito pode ser definido como uma conexão de impedância muito reduzida entre dois pontos de tensões diferentes, e pode ocorrer devido a problemas de isolamento nos condutores, problemas mecânicos, problemas de natureza térmica, problemas de manutenção, etc. (KINDERMANN, 1997).

As consequências desse tipo de falha são as altas correntes, que colocam em risco a integridade dos equipamentos das instalações de forma que, se tiverem uma duração prolongada sem serem sanadas podem provocar consequências de enorme proporção. Podem ocorrer em qualquer ponto do sistema elétrico de potência, porém, as linhas de transmissão são mais afetadas pelas correntes de falta devido à sua exposição a fenômenos naturais (descargas atmosféricas, temporais, ventos fortes, etc.). Na Tabela 1, é indicada a incidência de perturbações, não limitadas a curtos-circuitos, nos principais componentes do sistema elétrico brasileiro no ano de 2019 (ONS, 2020).

Tabela 1 – Principais origens de perturbações no sistema elétrico brasileiro.

<b>Componentes</b>	<b>(%)</b>
Linhas de Transmissão	69,08
Controles de Reativos	14,50
Transformadores	7,97
Barramentos	1,10
Outros	7,35

Fonte: Operador Nacional do Sistema - ONS (2020).

O curto-circuito não é um defeito previsível, e não é possível evitá-lo. Se tais defeitos não forem rapidamente eliminados, eles podem causar danos irremediáveis nos

componentes do sistema. Logo, percebe-se uma extrema importância no conhecimento das correntes de curto-circuito de um sistema elétrico de potência.

Os estudos de curto-circuito, para conhecimento das correntes de falta, têm diversas aplicações em um sistema elétrico. Dentre elas, pode-se destacar as descritas a seguir.

- a) Estudos de proteção, em que o cálculo dos valores das correntes de curto-circuito calculados em diversos pontos do sistema é utilizado para ajustes das funções de proteção.
- b) Dimensionamento de componentes como linhas de transmissão no que diz respeito ao limite suportável de temperatura de condutores, isoladores e cabos.
- c) Dimensionamento de transformadores de corrente (TC) em relação ao nível de saturação de seu núcleo.
- d) Dimensionamento e estudos de superação de disjuntores em relação à capacidade de interrupção simétrica de correntes de curto-circuito.

A corrente de curto-circuito deve fluir através do defeito enquanto o mesmo persistir, e podemos classificá-lo da seguinte maneira:

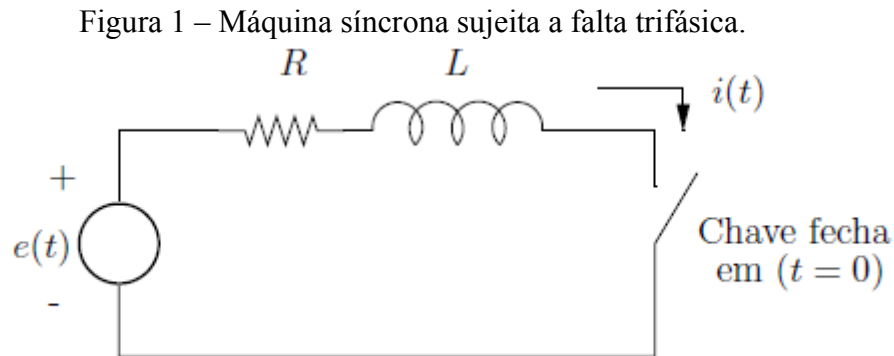
- a) curto-circuito simétrico: é aquele que envolve as três fases do sistema, sem criar um desbalanceamento;
- b) curto-circuito assimétrico: é aquele que envolve apenas uma fase, quando essa vai à terra, ou duas fases, podendo envolver a terra ou não. Esse tipo de falta cria um desbalanceamento no sistema.

## 2.2 MÁQUINA SÍNCRONA SOB CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO

O gerador síncrono é um dos elementos principais do sistema elétrico, por suprir a demanda de energia elétrica do sistema.

Na ocorrência de uma falta (curto-circuito) no sistema, a impedância vista pelo gerador síncrono cai bruscamente, e assim, para garantir o suprimento de energia, ele injeta uma corrente de curto-circuito muito elevada (KINDERMANN, 1997).

A modelagem analítica de máquinas síncronas para análise de faltas é feita com base no comportamento de tal máquina sob condições de uma falta trifásica nos seus terminais. A Figura 1 mostra um esquemático<sup>1</sup> do sistema descrito nesse parágrafo.



Fonte: Salgado (2016).

Onde a tensão interna da máquina é expressa por:

$$e(t) = V_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (1)$$

Pela Lei de Kirchhoff, e obtendo a solução da equação:

$$i(t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - \sin(\alpha - \theta)e^{-\frac{t}{\tau}}] \quad (2)$$

Onde:

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right)$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$$

$$\tau = \frac{L}{R}$$

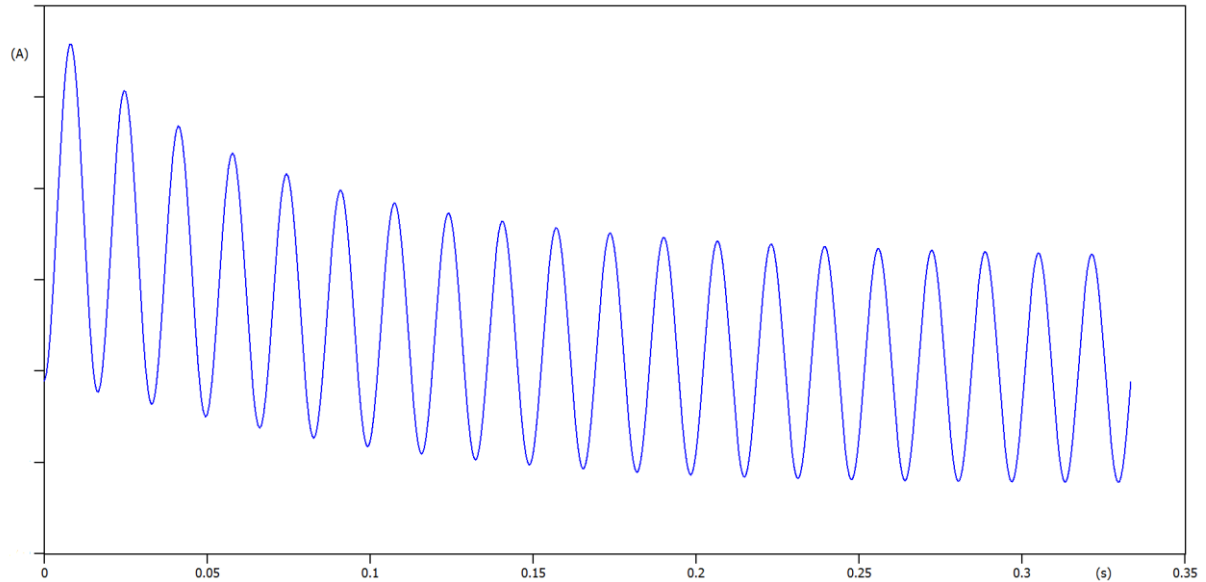
A corrente representada na equação 2 é chamada de corrente de curto-circuito assimétrica, onde  $i_{ac}(t) = \frac{V_m}{Z} [\sin(\omega t + \alpha - \theta)]$  é chamada de componente alternada e

<sup>1</sup> Nesse circuito, são desconsideradas as dinâmicas eletromecânicas para estudos de curto-circuito



$I_{cc}(t) = \frac{V_m}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{t}{\tau}}$  é chamada de componente contínua. Sua forma de onda pode ser vista na Figura 2.

Figura 2 – Forma de onda da corrente de curto-circuito.



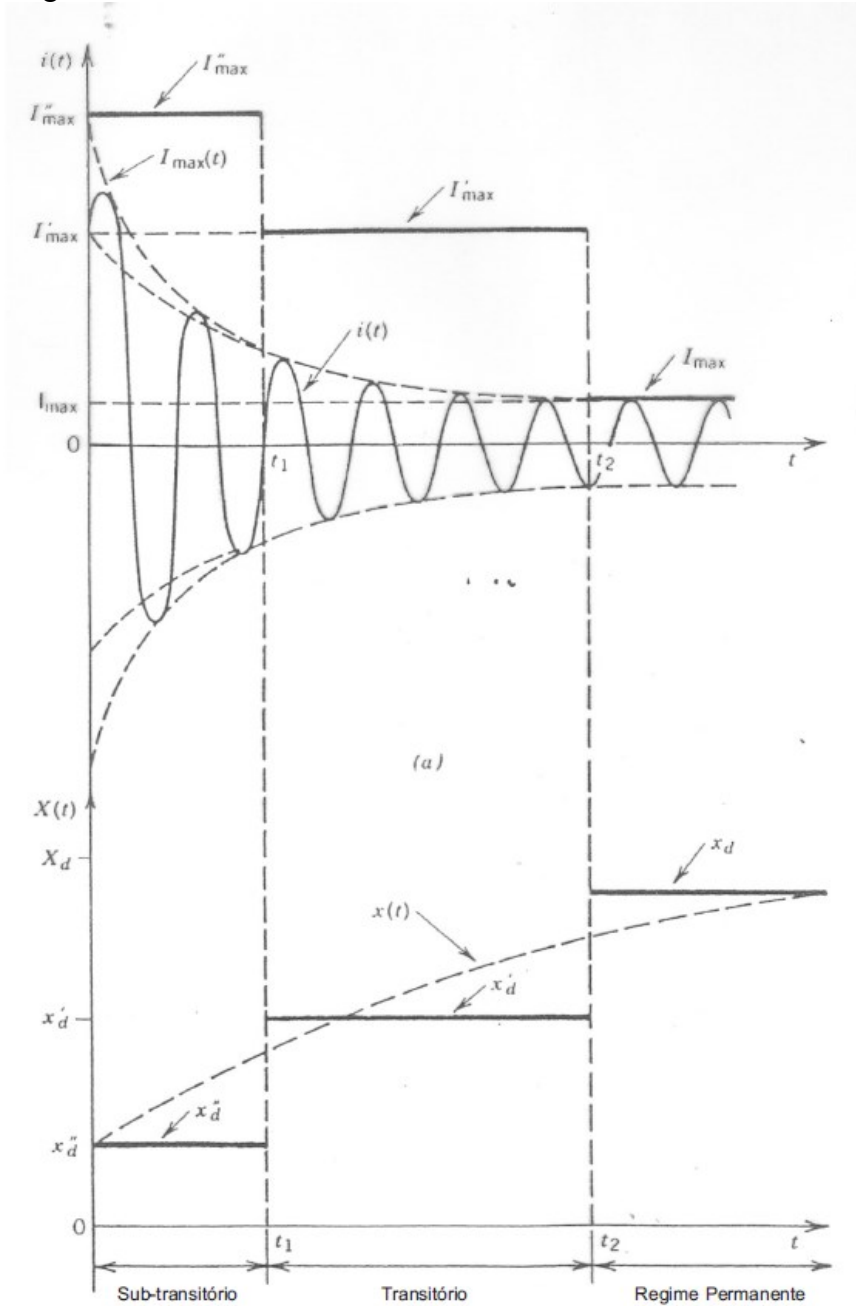
Fonte: Autor (2021).

A componente contínua da corrente de curto-circuito aparece devido à variação de fluxo magnético.

O valor de  $i(t)$  depende do ângulo  $\alpha$  da tensão. As faltas são imprevisíveis e não é conhecido o instante em que elas ocorrem, logo o ângulo  $\alpha$  não é conhecido a priori. Como as tensões de fase do gerador estão defasadas de  $120^\circ$  entre si, cada fase terá um valor diferente de componente contínua.

Retira-se a componente contínua para análise do comportamento do gerador, como é visto na Figura 3. Nota-se que, mesmo com a retirada da componente contínua, o valor de pico da corrente não é constante. Ele decai ciclo a ciclo, até que se estabiliza em um valor constante de regime permanente. Outra observação que deve ser feita é quanto à simetria da corrente em relação ao eixo do tempo, sendo assim comumente chamada de corrente de curto-circuito simétrica.

Figura 3 – Forma de onda da corrente de curto-circuito simétrica.



Fonte: Salgado (2016).

Como a corrente elétrica decai com o tempo, e o gerador é o componente que suprime tal corrente, pode-se dizer que ele tem reatância variável. A reatância inicial,  $X''_d$  tem um valor reduzido e é chamada de reatância subtransitória, que predomina durante o primeiro ciclo após a ocorrência da falta, e compreende a reatância de dispersão das bobinas do estator e do rotor, as influências dos enrolamentos amortecedores e as partes sólidas consideradas na dispersão do rotor (SALGADO, 2016). De acordo com a Figura 3, a reatância subtransitória (subsíncrona) é dada por:

$$X_d'' = \frac{E_{max}}{I''_{max}} \quad (3)$$

Onde  $E_{max}$  é o valor eficaz da tensão fase a neutro nos terminais do gerador síncrono antes do curto circuito e  $I''_{max}$  é o valor eficaz da corrente de curto-circuito do período subtransitório, ou seja, a corrente inicial.

Apesar de sua variação inicial, valores constantes são utilizados nos diferentes modelos. Assim, a reatância subtransitória é utilizada para análise de curto-circuito (SALGADO, 2016).

Todavia, as correntes assimétricas são as efetivas correntes de curto-circuito em um sistema real. Sua componente contínua (conhecida também por “DC”, do inglês “*Direct Current*”) depende do instante em que ocorre a falta e decai com o tempo, de acordo com uma constante de tempo. Tal constante de tempo depende da relação X/R do circuito percorrido pela corrente de falta. Neste trabalho o foco estará em cálculos de correntes simétricas, apenas citando a relação X/R para efeitos de critérios de superação de disjuntores.

### 2.3 COMPONENTES SIMÉTRICAS

A ocorrência de curtos-circuitos em um sistema elétrico de potência gera desbalanceamento no mesmo, dificultando, assim, os cálculos e simulações. Nesse caso, a aplicação de métodos convencionais, tais como equivalentes monofásicos, para resolução de problemas não é suficiente.

Em 1915, foi formulada uma ferramenta analítica proposta por Fortescue, que permite a decomposição de qualquer sistema de “ $n$ ” fases desequilibradas em suas respectivas componentes simétricas equilibradas. Essa formulação foi, mais tarde, adaptada e aplicada aos elementos que compõem o sistema elétrico de potência. Isso possibilitou a aplicação de todas as técnicas já conhecidas e dominadas de circuitos trifásicos equilibrados aos sistemas desbalanceados pelas faltas, através das componentes simétricas (KINDERMANN, 1997).

Segundo o Teorema de Fortescue, um sistema de  $n$  fasores desequilibrados pode ser decomposto em  $n$  sistemas de fasores equilibrados, denominadas componentes simétricas dos fasores originais. A expressão analítica geral para um sistema desequilibrado com  $n$  fases é dada a seguir:

$$\begin{aligned}
\dot{V}_a &= \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \cdots + \dot{V}_{a(n-1)} \\
\dot{V}_b &= \dot{V}_{b0} + \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} + \cdots + \dot{V}_{b(n-1)} \\
\dot{V}_c &= \dot{V}_{c0} + \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2} + \cdots + \dot{V}_{c(n-1)} \\
&\quad \vdots \\
\dot{V}_n &= \dot{V}_{n0} + \dot{V}_{n1} + \dot{V}_{n2} + \cdots + \dot{V}_{n(n-1)}
\end{aligned} \tag{4}$$

O sistema desequilibrado original de  $n$  fases ( $a, b, c, \dots, n$ ) é representado pelos seus  $n$  fasores  $\dot{V}_a, \dot{V}_b, \dot{V}_c, \dots, \dot{V}_n$  que giram em velocidade síncrona na frequência da rede polifásica.

Cada um dos fasores originais é decomposto em  $n$  fasores designados componentes de sequência. Assim, obtém-se um conjunto de  $n$  sistemas equilibrados, ou seja, os  $n$  sistemas de sequências descritas a seguir (KINDERMANN, 1997).

Cada sequência é composta de  $n$  fasores equilibrados entre si, ou seja, de mesmo módulo e igualmente defasados.

A defasagem de dois fasores consecutivos desse “novo sistema equilibrado” de sequência  $k$ -ésima é o ângulo  $\theta_k$ :

$$\theta_k = k \left( \frac{2\pi}{n} \right) \tag{5}$$

Desta maneira, tem-se o sistema de sequência zero que é o conjunto de fasores  $\dot{V}_{a0}, \dot{V}_{b0}, \dot{V}_{c0}, \dots, \dot{V}_{n0}$ , todos de mesmo módulo e de mesma fase, girando no sentido e velocidade síncrona do sistema original de  $n$  fases, o sistema de sequência 1 (positiva), que é o conjunto de  $n$  fasores ( $\dot{V}_{a1}, \dot{V}_{b1}, \dot{V}_{c1}, \dots, \dot{V}_{n1}$ ) de mesmo módulo, porém defasados por um ângulo de  $\frac{2\pi}{n}$ , girando no mesmo sentido e velocidade do sistema polifásico original, o sistema de sequência 2 (negativa) que, da mesma forma, é o conjunto de fasores  $\dot{V}_{a2}, \dot{V}_{b2}, \dot{V}_{c2}, \dots, \dot{V}_{n2}$ , de mesmo módulo, com defasagem entre si de  $2\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ , girando no mesmo sentido e velocidade síncrona do sistema original, até o sistema de sequência  $k$ -ésima, que é o conjunto de fasores  $\dot{V}_{ak}, \dot{V}_{bk}, \dot{V}_{ck}, \dots, \dot{V}_{nk}$ , de mesmo módulo, com defasamento entre si de  $k\left(\frac{2\pi}{n}\right)$ , girando no mesmo sentido e velocidade síncrona do sistema polifásico original.

Observa-se que, fisicamente, o sentido da sequência 2 ou de todas as outras de ordem par têm os seus conjuntos de sequência girando contrários aos da sequência 1 ou de ordem ímpar. Isso é o que acontece em um sistema físico real, pois as sequências de ordem par geram campos girantes contrários aos do sistema original. Como apresentado no teorema de Fortescue, no entanto, todas as sequências giram no mesmo sentido. Isto é obtido permutando coerentemente as fases das sequências pares, de modo a possibilitar o equacionamento e as operações com os fasores (KINDERMANN, 1997).

Como o sistema elétrico de potência é trifásico, será feito um aprofundamento no Teorema de Fortescue aplicado em sistemas de três fases.

Segundo o Teorema de Fortescue, um sistema trifásico com três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas, cada um com três fasores equilibrados chamados de componentes simétricas de sequência positiva, sequência negativa e sequência zero.

### **2.3.1 Sistema trifásico de sequência positiva**

É um conjunto de três fasores equilibrados de mesmo módulo, defasados de  $120^\circ$ , com sequência de fase igual ao do sistema trifásico desbalanceado.

O sistema trifásico original tem uma sequência de fase abc, cujos fasores giram na velocidade síncrona. Na sequência positiva essa sequência de fases e a velocidade síncrona são mantidas.



$$\dot{V}_{a1}$$

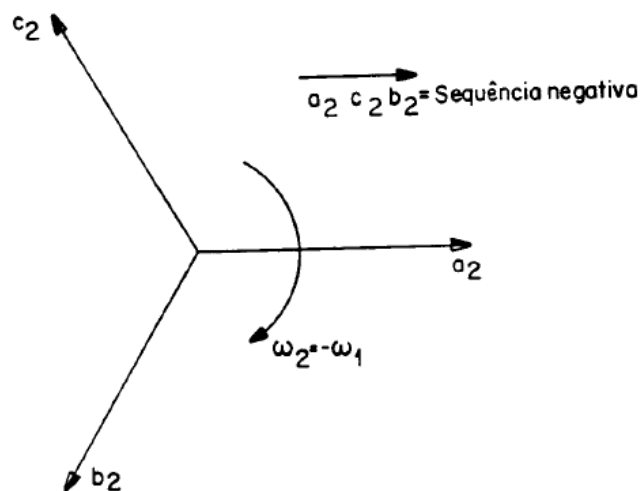
$$\dot{V}_{b1} = a^2 \cdot \dot{V}_{a1} \quad (9)$$

$$\dot{V}_{c1} = a \cdot \dot{V}_{a1}$$

### 2.3.2 Sistema trifásico de sequência negativa

É um conjunto de três fasores equilibrados girando em uma sequência de fase contrária ao sistema original, em velocidade síncrona contrária à sequência positiva. O diagrama fasorial da sequência negativa real pode ser representado da seguinte maneira:

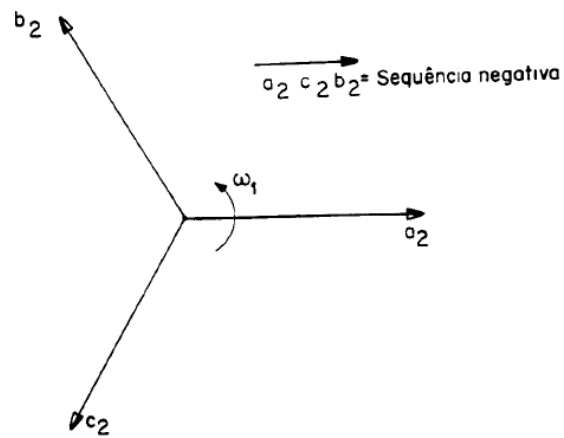
Figura 5 – Sequência negativa real.



Fonte: Kindermann (1997).

Esse diagrama fasorial deve ser modificado para possibilitar as operações algébricas com fasores, isto é, os fasores de sequência negativa deverão girar no mesmo sentido da sequência positiva. Esse procedimento pode ser feito trocando o fasor c pelo fasor b, como visto na Figura 6, com o sistema já modificado e girando no mesmo sentido da sequência positiva:

Figura 6 – Sequência negativa modificada.



Fonte: Kindermann (1997).

A partir disso, colocam-se os fasores de tensão em função da tensão da fase a:

$$\dot{V}_{a2}$$

$$\dot{V}_{b2} = \dot{a} \cdot \dot{V}_{a2} \quad (10)$$

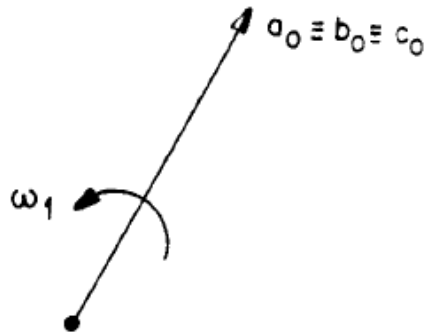
$$\dot{V}_{c2} = \dot{a}^2 \cdot \dot{V}_{a2}$$

### 2.3.3 Sistema trifásico de sequência zero

É um conjunto de três fasores iguais, de mesmo módulo e fase e girando no mesmo sentido do sistema original desbalanceado. Pode ser representado pela Figura 7.



Figura 7 – Sequência zero.



Fonte: Kindermann (1997).

Em termos de tensão:

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{b0} = \dot{V}_{c0} \quad (11)$$

### 2.3.4 Expressão analítica do Teorema de Fortescue

Como foi visto nas seções anteriores, um sistema trifásico desbalanceado pode ser representado por três sistemas trifásicos equilibrados de seqüências positiva, negativa e zero. Fazendo a superposição desses sistemas, obtêm-se as expressões analíticas do Teorema de Fortescue:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2}$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{b0} + \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} \quad (12)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{c0} + \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2}$$

Utilizando o fasor  $\dot{a}$  para representação do sistema, as componentes do sistema podem ser expressas todas em função da fase a como mostram as expressões dadas em (13). Isso pode ser feito devido ao sistema trifásico de seqüência ser equilibrado, então basta fazer o estudo de apenas uma fase para conhecer o comportamento das outras.

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2}$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_{a0} + \dot{a}^2 \dot{V}_{a1} + \dot{a} \dot{V}_{a2} \quad (13)$$

$$\dot{V}_c = \dot{V}_{a0} + \dot{a} \dot{V}_{a1} + \dot{a}^2 \dot{V}_{a2}$$

De forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Representando a matriz por T:

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

A matriz T é conhecida como matriz transformação das componentes de sequência nos fasores originais do sistema desbalanceado.

Ao invés de tensões (V), poderíamos ter representado os fasores como correntes (I).

Para obtenção das componentes de sequência em função do sistema desbalanceado, basta seguir a seguinte expressão:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} \quad (16)$$

Onde a matriz que multiplica as componentes do sistema desbalanceado é chamada de matriz  $T^{-1}$ .

No caso de correntes, o sistema pode ser escrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (17)$$

### 2.3.5 Corrente de seqüência zero

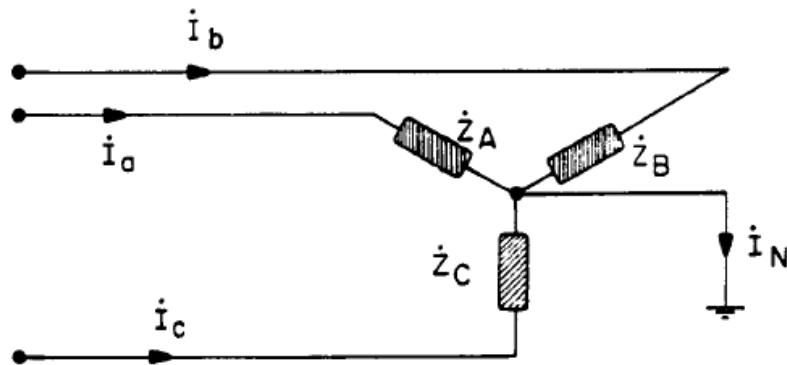
Devido a algumas peculiaridades, a componente de seqüência zero da corrente deve ser estudada de maneira separada.

Da equação 17, o fasor de seqüência zero  $\dot{I}_{a0}$  é escrito da seguinte forma:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (18)$$

O caso de um transformador ligado em Y aterrado ou de uma carga equilibrada ou não é ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – Carga ligada em Y aterrado.



Fonte: Kindermann (1997).

Aplicando a primeira Lei de Kirchhoff e substituindo na equação 18, tem-se:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{I}_N}{3} \quad (19)$$

Isso significa que só pode existir corrente de seqüência zero em um sistema aterrado ou com neutro. Em sistemas sem aterramento ou neutro, ou sistemas ligados em delta, tem-se que  $\dot{I}_{a0} = 0$ , o que significa que não existe corrente de seqüência zero como em sistemas em Y aterrado.

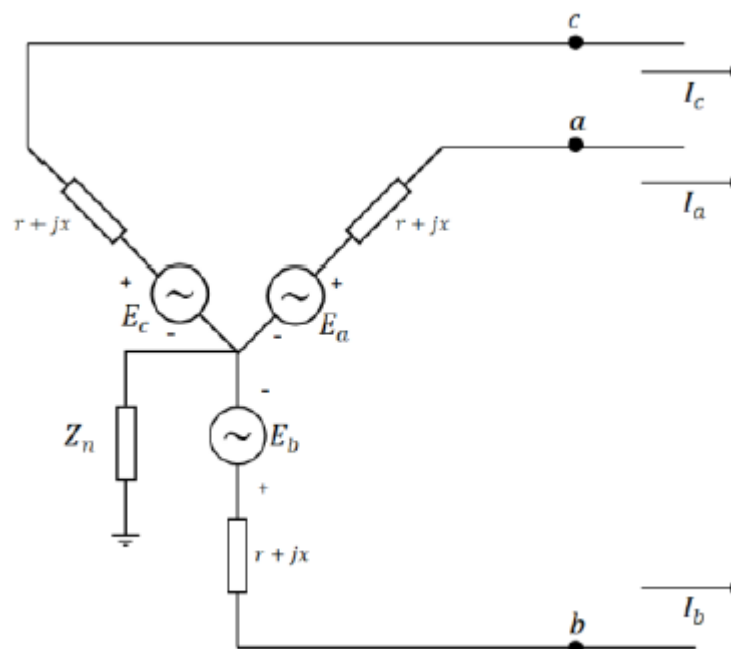
## 2.4 REPRESENTAÇÃO DOS COMPONENTES NO DOMÍNIO DA SEQUÊNCIA

Um sistema elétrico trifásico desbalanceado pode ser decomposto em três sistemas elétricos trifásicos balanceados, denominados de sequência positiva, negativa e zero, segundo o Teorema de Fortescue. Assim, para fins de cálculo de correntes e tensões que aparecem em um sistema durante uma falta, deve-se obter um modelo do sistema para cada sequência. Os modelos de cada um dos principais componentes do sistema elétrico de potência serão vistos nesta seção.

### 2.4.1 Geradores síncronos

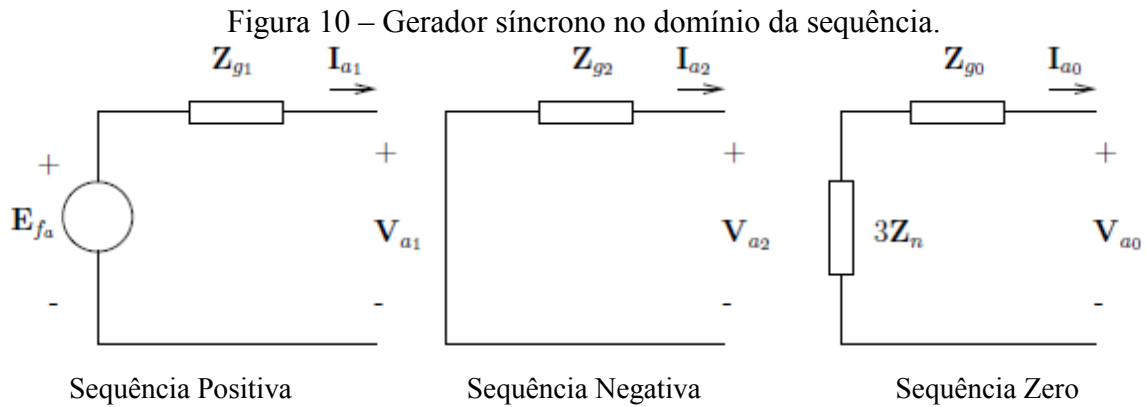
O gerador síncrono é o elemento que alimenta o curto-circuito, logo é considerado o elemento ativo no suprimento dessa corrente.

Figura 9 – Gerador síncrono em Y aterrado.



Fonte: Grainger e Stevenson (1994).

A representação de um gerador no domínio da sequência é feita da seguinte maneira:



Fonte: Salgado (2016).

Onde (seguindo a simbologia da referência supracitada):

$E_{fa}$  é a força eletromotriz interna do gerador;

$Z_{g1}$  é a impedância de seqüência positiva do gerador;

$I_{a1}$  é a corrente de seqüência positiva do gerador;

$V_{a1}$  é a tensão de seqüência positiva nos terminais do gerador;

$Z_{g2}$  é a impedância de seqüência negativa do gerador;

$I_{a2}$  é a corrente de seqüência negativa do gerador;

$V_{a2}$  é a tensão de seqüência negativa nos terminais do gerador;

$Z_{g0}$  é a impedância de seqüência zero do gerador;

$I_{a0}$  é a corrente de seqüência zero do gerador;

$V_{a0}$  é a tensão de seqüência zero nos terminais do gerador;

$Z_n$  é a impedância de aterramento do gerador.

## 2.4.2 Transformadores

O transformador é um dos ativos mais importantes do sistema elétrico de potência, possibilitando a transmissão de energia com perdas reduzidas, devendo-se assim, fazer sua modelagem no domínio da seqüência para estudo do seu comportamento durante a ocorrência de uma falta.

As impedâncias de seqüências positiva e negativa são iguais à impedância de dispersão do transformador, obtidas através do ensaio de curto-circuito:

$$\dot{Z}_1 = \dot{Z}_2 = \dot{Z}_{cc} \quad (20)$$

A impedância de sequência zero depende de uma variedade de fatores tais como aspectos construtivos e do tipo de ligação do transformador em questão. A Figura 11 mostra o circuito equivalente de sequência zero de para cada tipo de ligação. A impedância de neutro não é enfatizada na Figura 11, porém é considerada nos cálculos.

Figura 11 – Ligações de transformadores e suas respectivas modelagens em sequência zero.

Caso	Símbolos	Diagramas de Conexão	Equivalentes de sequência zero
1			
2			
3			
4			
5			

Fonte: Adaptado de Grainger e Stevenson (1994).

### 2.4.3 Linhas de transmissão

As linhas de transmissão são os componentes do sistema que transportam a energia elétrica do ponto de geração até o consumidor. Devido à sua exposição, elas ficam sujeitas a todo tipo de riscos e condições variáveis que podem levar a diversas falhas, incluindo curto-circuito. Geralmente, têm a impedância elevada, predominantemente indutiva.

No domínio da sequência, a impedância de sequência positiva é a impedância “normal” da linha, assim como é a impedância de sequência negativa. Isso ocorre pois a linha de transmissão é um componente estático. Assim:

$$\dot{Z}_{1LT} = \dot{Z}_{2LT} = \dot{Z}_{LT} \quad (21)$$

Porém, é difícil determinar com precisão a sua impedância de sequência zero porque as correntes de sequência zero podem retornar pelos mais variados caminhos, tais como cabos de cobertura, o aterramento, as torres de linha, etc. (SALGADO, 2016). Além disso, as impedâncias da terra dependem do tipo de solo (resistividades variadas) e da umidade. Logo, essa impedância é o parâmetro de menor precisão no sistema elétrico de potência para estudos de curto-circuito, sendo recomendável a obtenção do mesmo através de ensaios de campo. Uma aproximação utilizada (onde as impedâncias de linha são aquelas definidas no projeto básico) é (KINDERMANN, 1997):

$$\dot{Z}_{0LT} = 2 a 6 \dot{Z}_{1LT} \quad (22)$$

## 2.5 FALTAS ASSIMÉTRICAS NO GERADOR SÍNCRONO

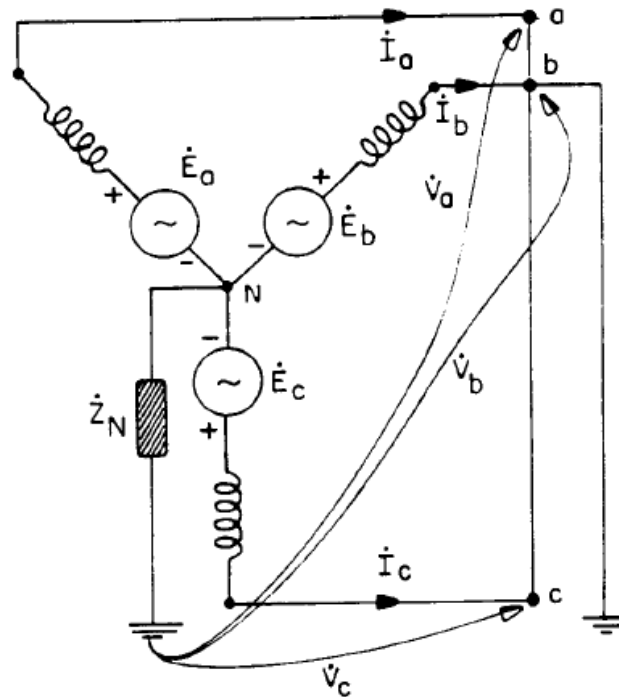
Curtos-circuitos assimétricos causam desbalanceamentos no sistema elétrico de potência, isto é, os sistemas não podem ser representados somente pela sequência positiva durante a ocorrência de uma falta assimétrica.

Pode-se reduzir qualquer tipo de sistema elétrico a um circuito equivalente de Thévenin (SALGADO, 2016), incluindo sistemas formados pelas componentes de sequência, provenientes da decomposição de um sistema desbalanceado, nesse caso resultando em três equivalentes de Thévenin, correspondentes às redes de sequências positiva, negativa e zero. Nesse tipo de representação, somente as redes de sequência positiva possuem fontes independentes. Dessa forma, esses circuitos se assemelham aos mostrados na Figura 10. Isso possibilita a análise de faltas assimétricas no sistema a partir da análise de faltas assimétricas em geradores síncronos.

### 2.5.1 Curto-circuito trifásico no gerador síncrono

Esse tipo de falta, solidamente aterrada, é ilustrada na Figura 12.

Figura 12 – Falta trifásica em um gerador síncrono.



Fonte: Kindermann (1997).

Da figura (onde os fasores são representados por  $V_a$ ,  $I_a$ , etc. de maneira análoga a  $\dot{V}_a$ ,  $\dot{I}_a$ , etc.), tem-se que a falta é caracterizada pelas seguintes equações:

$$\dot{V}_a = \dot{V}_b = \dot{V}_c = 0$$

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$$

Assim, no domínio da sequência:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Resultando em:



$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = 0 \quad (23)$$

Por outro lado

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{a}^2 \cdot \dot{I}_a \\ \dot{a} \cdot \dot{I}_a \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \cdot (1 + \dot{a}^2 + \dot{a}) \\ \dot{I}_a \cdot (1 + \dot{a}^3 + \dot{a}^3) \\ \dot{I}_a \cdot (1 + \dot{a}^4 + \dot{a}^2) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \dot{I}_a \\ 0 \end{bmatrix}$$

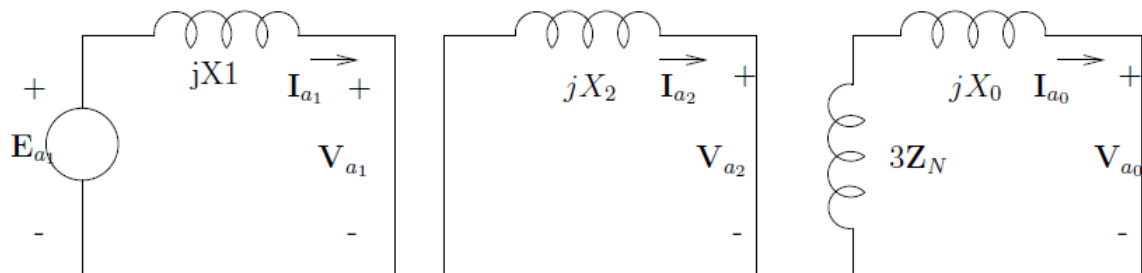
Assim,

$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a2} = 0$$

$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_a \quad (24)$$

Tais condições implicam que todas as redes de seqüência estão em curto-circuito, como pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Conexão dos circuitos de seqüência do gerador síncrono na falta trifásica.



Fonte: Salgado (2016).

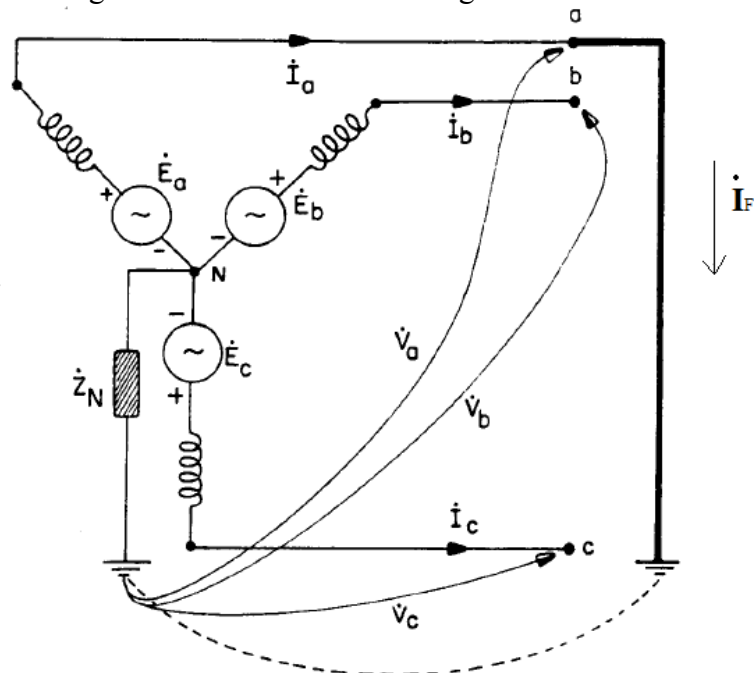
A corrente de seqüência positiva é dada por:

$$i_{a1} = \frac{\dot{E}_a}{jX_1} \quad (25)$$

### 2.5.2 Curto-circuito fase-terra no gerador síncrono

Esse tipo de falta, solidamente aterrada, é ilustrada na Figura 14:

Figura 14 – Falta fase-terra no gerador síncrono.



Fonte: Kindermann (1997).

As equações que modelam esse tipo de falta são:

$$\dot{V}_a = 0$$

$$i_b = i_c = 0$$

Pode-se calcular, assim:

$$\begin{bmatrix} i_{a0} \\ i_{a1} \\ i_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Assim,

$$i_{a0} = i_{a1} = i_{a2} = \frac{i_a}{3} \quad (26)$$

Tal que a corrente que flui para a terra,  $\dot{I}_F$ , é:

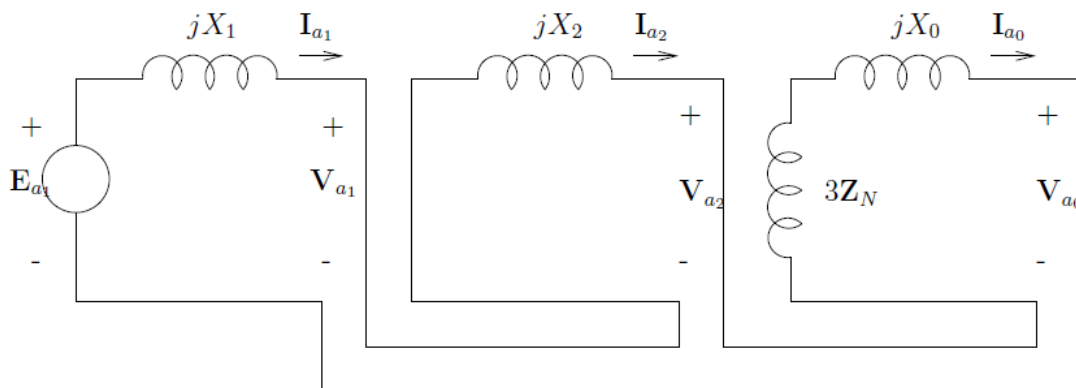
$$\dot{I}_F = \dot{I}_a = 3\dot{I}_{a0}$$

Por outro lado,

$$\dot{V}_a = \dot{V}_{a0} + \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} = 0 \quad (27)$$

Para atendimento das equações 26 e 27, as redes de seqüência do gerador síncrono devem estar conectadas em série, como mostra a Figura 15.

Figura 15 – Conexão dos circuitos de seqüência do gerador síncrono na falta fase-terra.

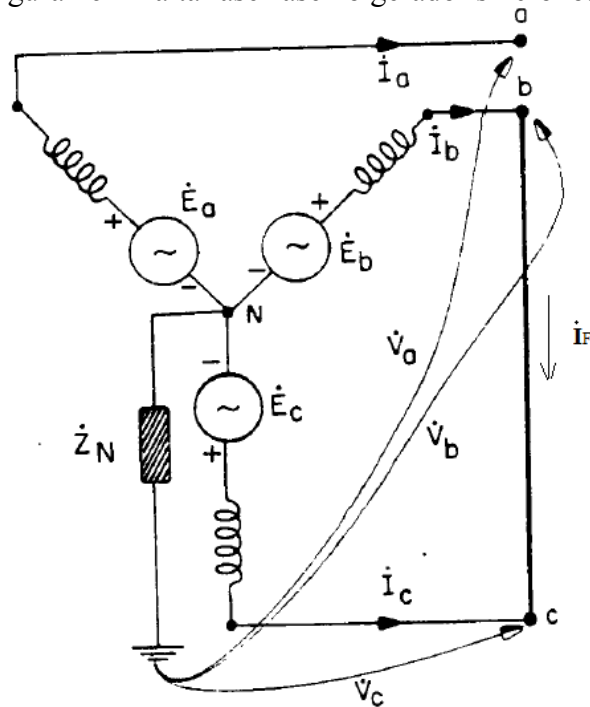


Fonte: Salgado (2016).

### 2.5.3 Curto-circuito fase-fase no gerador síncrono

Esse tipo de falta é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 – Falta fase-fase no gerador síncrono.



Fonte: Kindermann (1997).

As equações que caracterizam tal curto-circuito no domínio da fase estão representadas abaixo:

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c$$

$$\dot{I}_a = 0$$

$$\dot{I}_c = -\dot{I}_b$$

Substituindo as equações acima na expressão 17, tem-se:

$$\dot{I}_a = 0 \tag{28}$$

A corrente de sequência zero é igual a zero pois o tipo de falta não envolve a terra, ocorrendo somente entre as fases. Da mesma mesma forma, é obtido também:

$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1} \tag{29}$$

Utilizando as equações que descrevem este tipo de falta e substituindo na equação 16, tem-se:

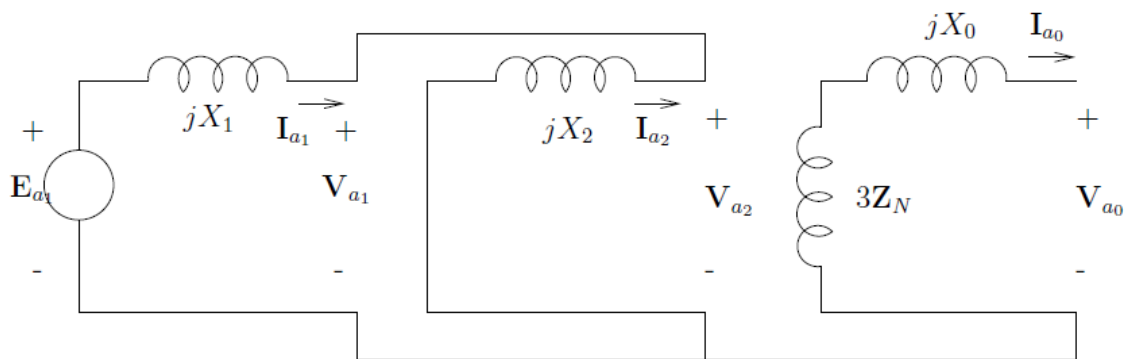
$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} \quad (30)$$

Também:

$$\dot{V}_{a0} = 0 \quad (31)$$

A partir das equações 28, 29, 30 e 31, conclui-se que para representar a falta fase-fase (bifásica), os modelos de sequência devem ser ligados em paralelo como pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 – Conexão dos circuitos de sequência do gerador síncrono na falta fase-fase.

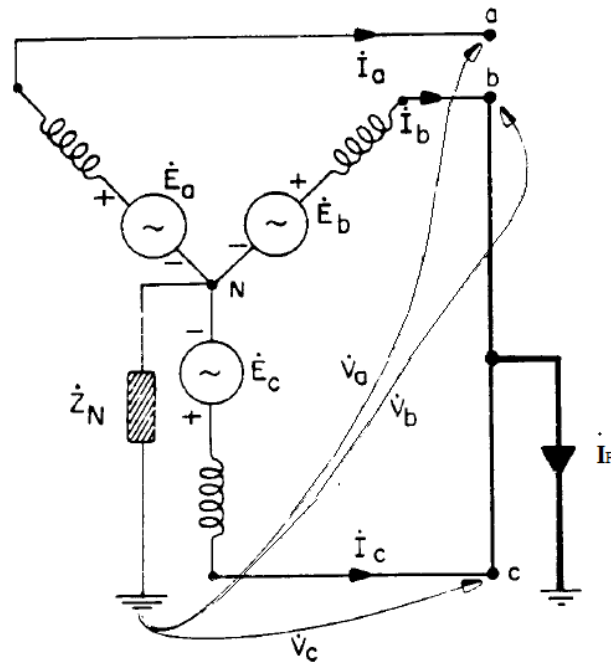


Fonte: Salgado (2016).

#### 2.5.4 Curto-circuito fase-fase-terra no gerador síncrono

Esse tipo de falta, solidamente aterrada, é ilustrada na Figura 18.

Figura 18 – Falta fase-fase-terra no gerador síncrono.



Fonte: Kindermann (1997).

As equações que caracterizam tal curto no domínio da fase estão representadas abaixo:

$$\dot{V}_b = \dot{V}_c = 0$$

$$\dot{I}_a = 0$$

Utilizando as expressões 16 e 17, e substituindo os valores acima nas mesmas, obtém-se:

$$\dot{V}_{a0} = \dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = \frac{\dot{V}_a}{3} \quad (32)$$

Também:

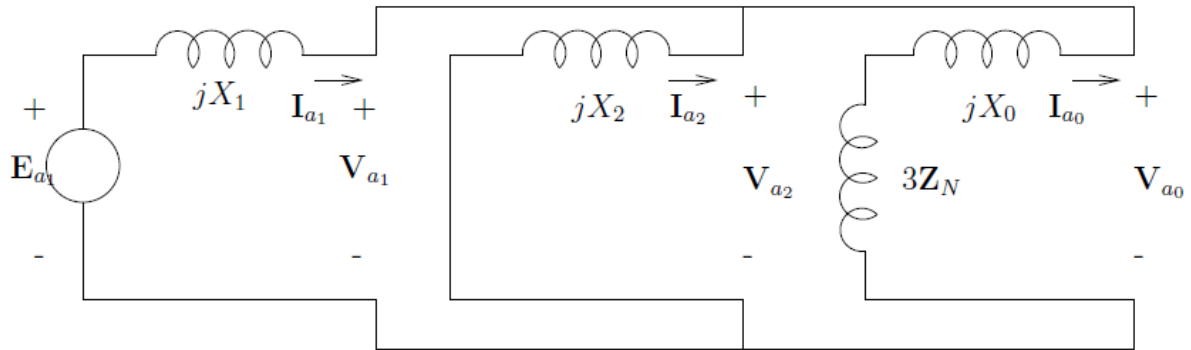
$$\dot{I}_a = \dot{I}_{a0} + \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = 0 \quad (33)$$

Observa-se, também, que a corrente de falta  $\dot{I}_F$  é dada (para uma falta solidamente aterrada) por:

$$\dot{I}_F = \dot{I}_b + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{a0} \quad (34)$$

Para satisfazer as equações 32 e 33, as redes de seqüência do gerador síncrono devem ser ligadas em paralelo, conforme a Figura 19.

Figura 19 – Conexão dos circuitos de seqüência do gerador síncrono na falta fase-fase-terra.



Fonte: Salgado (2016).

## 2.6 O CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA ELÉTRICO

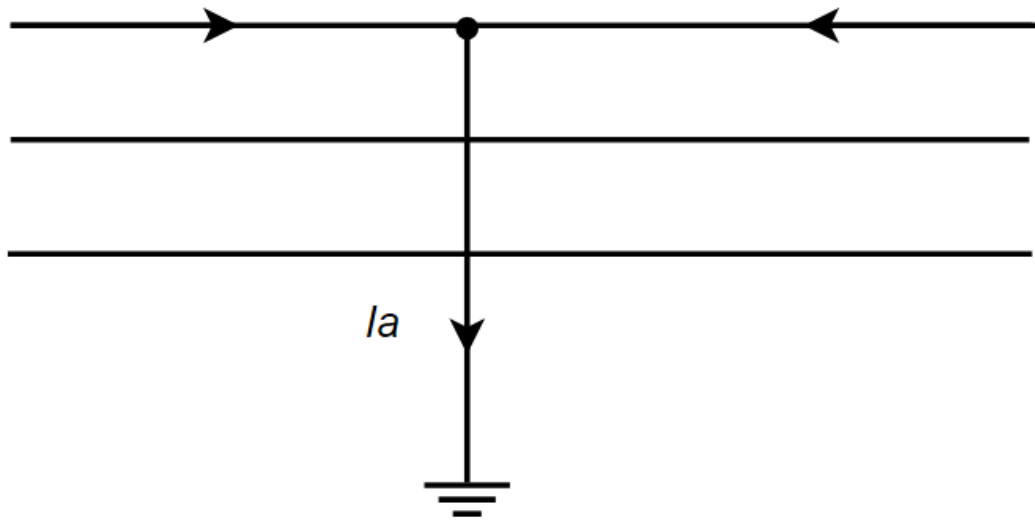
Para o cálculo das correntes de uma falta assimétrica em uma rede elétrica, aplica-se a mesma técnica utilizada no cálculo das correntes de faltas assimétricas em geradores síncronos operando a vazio.

Deve-se substituir cada rede de seqüência por seu equivalente Thévenin, visto do ponto de ocorrência do defeito. A ligação entre tais equivalentes deve ser feita de acordo com o tipo da falta.

### 2.6.1 Curto-circuito monofásico no sistema

O diagrama representativo de uma falta monofásica no sistema é mostrado na Figura 20.

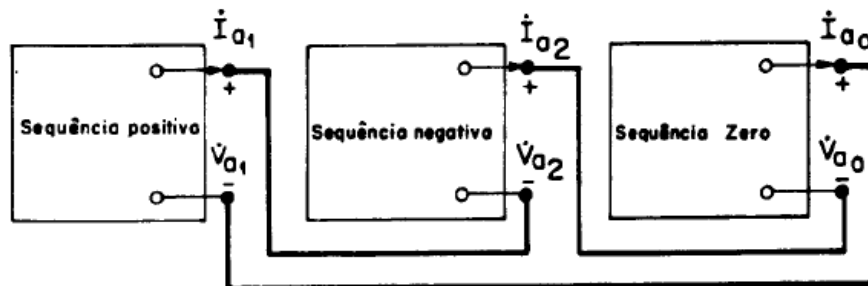
Figura 20 – Diagrama de um curto-circuito monofásico.



Fonte: Autor (2021).

Nesse tipo de falta, ligam-se os equivalentes de Thévenin das seqüências positiva, negativa e zero em série como é mostrado na Figura 21.

Figura 21 – Modelo de seqüência em uma falta monofásica no sistema.



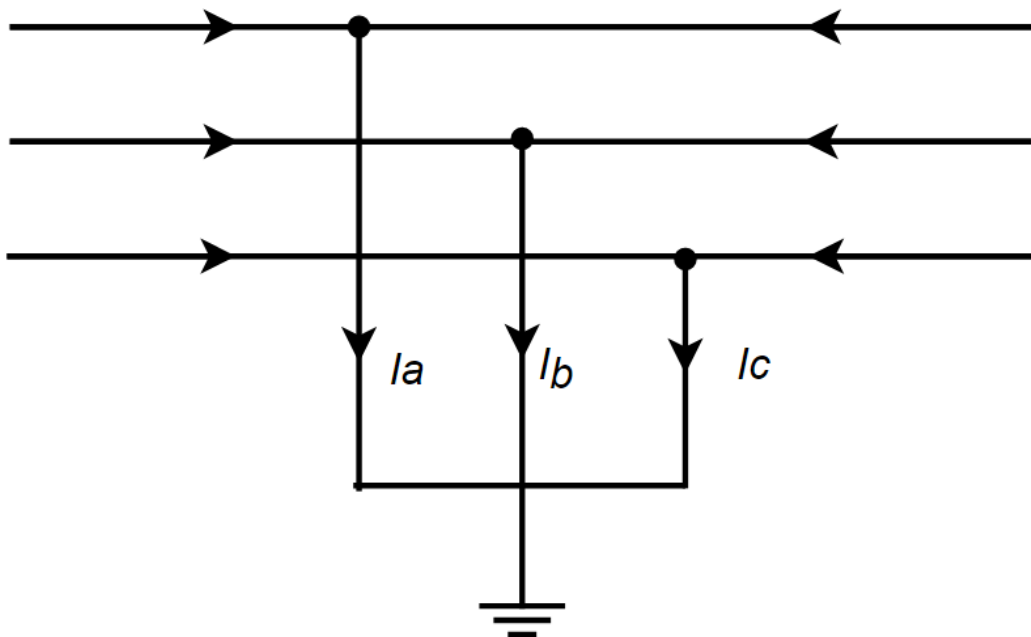
Fonte: Kindermann (1997).

### 2.6.2 Curto-circuito trifásico no sistema

O diagrama representativo de uma falta trifásica no sistema é mostrado na Figura 22.



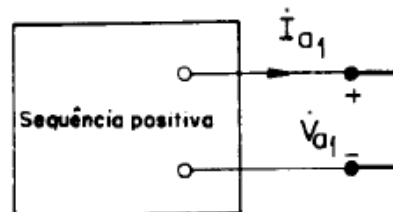
Figura 22 – Diagrama de um curto-circuito trifásico.



Fonte: Autor (2021).

A representação dos componentes de sequência de um curto-circuito trifásico é mostrada na figura abaixo.

Figura 23 – Modelo de sequência positiva em uma falta trifásica no sistema.

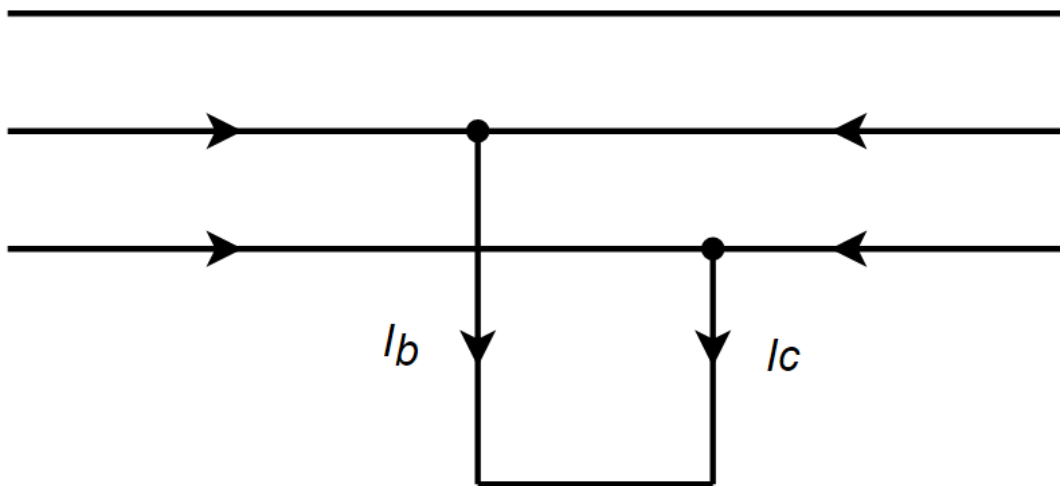


Fonte: Kindermann (1997).

### 2.6.3 Curto-circuito fase-fase no sistema

O diagrama de uma falta fase-fase é mostrado na figura abaixo.

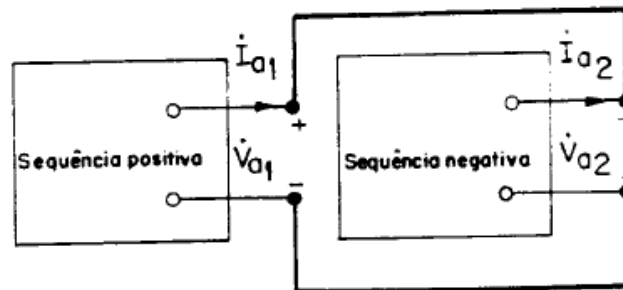
Figura 24 – Diagrama de um curto-circuito fase-fase.



Fonte: Autor (2021).

Nesse tipo de falta, ligam-se os equivalentes de Thévenin das seqüências positiva e negativa em paralelo como é mostrado na Figura 25.

Figura 25 – Modelo de seqüência em uma falta fase-fase no sistema.

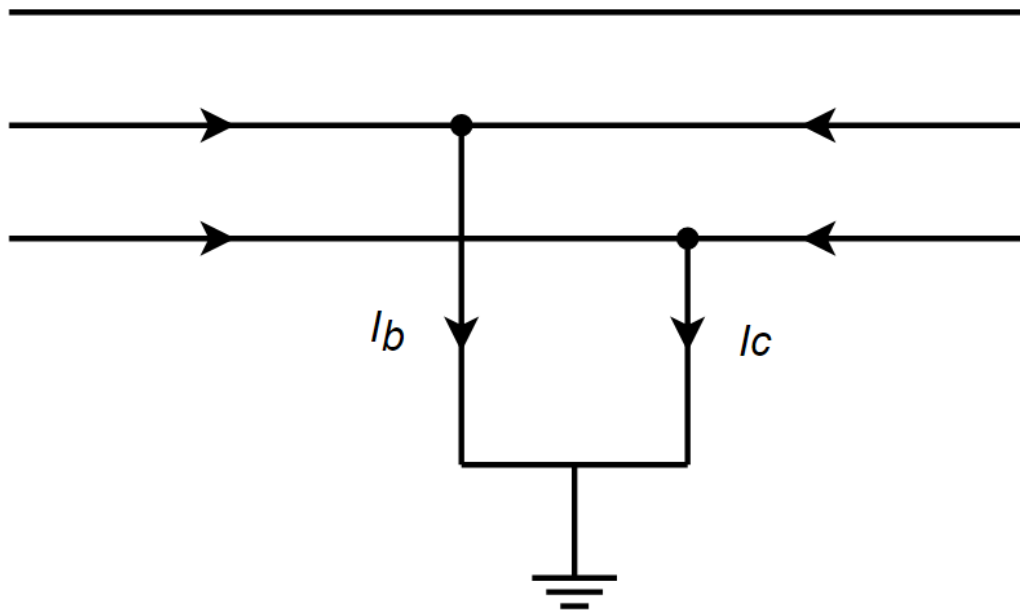


Fonte: Kindermann (1997).

#### 2.6.4 Curto-circuito fase-fase-terra no sistema

Um curto-circuito fase-fase-terra no sistema é mostrado na Figura 26.

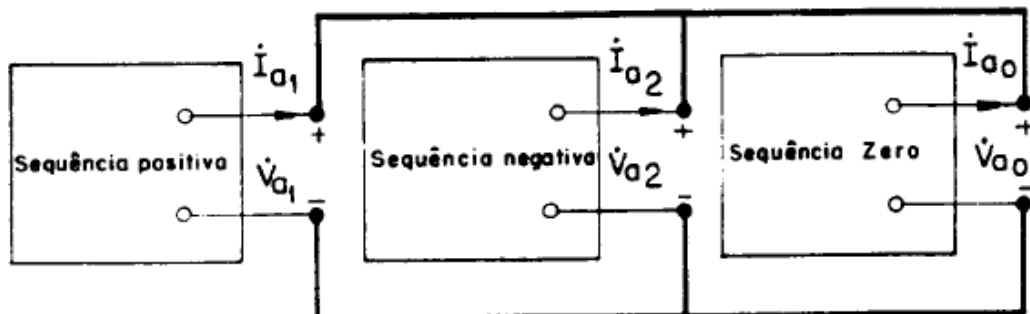
Figura 26 – Diagrama de um curto-circuito fase-fase-terra.



Fonte: Autor (2021).

Nesse tipo de falta, ligam-se os equivalentes de Thévenin das sequências positiva, negativa e zero em paralelo como é mostrado na Figura 27.

Figura 27 – Modelo de sequência em uma falta fase-fase-terra no sistema.



Fonte: Kindermann (1997).

Para análise de sistemas mais robustos, como o Sistema Interligado Nacional, comumente abreviado por SIN, são utilizadas ferramentas computacionais que em sua implementação representam o sistema de forma matricial através das matrizes de admitância e impedância. Tais matrizes são conhecidas como  $Z_{barra}$  e  $Y_{barra}$ , e algumas considerações sobre elas são feitas no Apêndice A.

## 2.7 DISJUNTORES

O disjuntor é um equipamento de manobra capaz de controlar sistemas elétricos por meio de abertura ou fechamento de contatos separáveis. Ele é um dos equipamentos de maior complexidade presentes em subestações e tal complexidade vem do fato de ele desempenhar diversas funções de difícil execução. Algumas dessas funções são listadas abaixo:

- a) sua principal função é a interrupção de correntes de falta tão rapidamente quanto possível, de forma a eliminar a falha e reduzir os danos por ela causados;
- b) capacidade de interromper correntes normais de carga, correntes de magnetização de transformadores e reatores, correntes capacitivas de bancos de capacitores e de linhas em vazio;
- c) capacidade de fechamento de circuitos em condições normais e em condições de falta;
- d) condução de correntes de carga na posição fechada e isolamento entre duas partes do sistema elétrico.

Um disjuntor deve ser mecanicamente capaz de abrir em tempos tão curtos quanto dois ciclos após ter permanecido fechado por um longo período de tempo. Dessa maneira, o projeto mecânico deve ser feito cuidadosamente, levando-se em consideração a massa e mobilidade dos componentes do disjuntor (FRONTIN, 2013).

### 2.7.1 Classificação de disjuntores

No início da abertura entre os contatos de um disjuntor, que ocorre para interromper a passagem da corrente (no momento em que ela passa por zero), forma-se um arco elétrico entre esses contatos, o qual deve ser extinto no interior do próprio disjuntor. A extinção desse arco elétrico pode ser feita utilizando diferentes técnicas de interrupção. Pela variedade nas técnicas de interrupção de arco elétrico em disjuntores, esses equipamentos são classificados pelos meios de extinção e mecanismos de operação. Essas classificações estão descritas a seguir.

### *2.7.1.1 Ar livre*

Os disjuntores a ar livre são os mais simples, utilizados em pequena escala. São empregados para abertura de circuitos com baixíssima carga e de baixa tensão.

### *2.7.1.2 Sopros magnético*

Em disjuntores a sopro magnético os contatos se abrem no ar empurrando o arco voltaico para dentro das câmaras de extinção através de forças produzidas pelo campo magnético da própria corrente, passando por uma ou mais bobinas e, eventualmente, por um sopro pneumático auxiliar, produzido pelo mecanismo de acionamento.

Nesse tipo de disjuntores, a extinção do arco, dentro da câmara de extinção, ocorre devido ao aumento na resistência do arco (e conseqüentemente da sua tensão), aumento esse conseguido através do aumento do comprimento do arco voltaico, da fragmentação do arco em diversos arcos menores nas fendas da câmara de extinção. Dessa forma, ocorre o resfriamento do arco através do seu contato com as diversas paredes da câmara (GASPAR, 2006).

### *2.7.1.3 Ar comprimido*

Nos disjuntores a ar comprimido, a extinção do arco é obtida a partir da admissão, nas câmaras de ar comprimido, é armazenado em um reservatório pressurizado, que soprado sobre a região entre os contatos determina o resfriamento do arco e sua compressão. A intensidade e a rapidez do sopro garantem o sucesso do disjuntor (FRONTIN, 2013).

### *2.7.1.4 Óleo*

Nos disjuntores a óleo, os dispositivos de interrupção são imersos em óleo isolante. O princípio da extinção do arco nesse tipo de disjuntor é baseado na decomposição das moléculas de óleo pela energia do arco, resultando na formação de gases que têm um efeito refrigerante, resfriando o arco, e causando um aumento da pressão em torno do arco, forçando-o a se extinguir.

### 2.7.1.5 *Vácuo*

Nos disjuntores a vácuo, o arco é mantido por íons de material metálico vaporizado provenientes dos contatos, e quando a corrente elétrica atinge o valor zero, o intervalo entre os contatos é rapidamente desionizado pela condensação dos vapores metálicos sobre os eletrodos (GASPAR, 2006).

### 2.7.1.6 *Hexafluoreto de Enxofre (SF<sub>6</sub>)*

Nos disjuntores de SF<sub>6</sub>, o gás é armazenado em um recipiente de alta pressão e liberado sobre a região entre os contatos do disjuntor, porém, ao atravessar as câmaras de interrupção, o hexafluoreto de enxofre não é descarregado na atmosfera e sim em um reservatório com SF<sub>6</sub> à baixa pressão. Dessa forma, o gás a alta pressão é utilizado para interrupção do arco e o gás a baixa pressão serve para a manutenção do isolamento entre as partes energizadas e a terra (FRONTIN, 2013).

### 2.7.1.7 *Semicondutores*

A técnica de interrupção de arco elétrico a semicondutores apresenta a ausência de manifestações externas como principal característica. A resistência dos semicondutores tem como característica passar rapidamente de um valor muito baixo para um valor considerável quando a corrente elétrica passa pelo valor zero, como acontece com o arco elétrico (CARVALHO, PUENTE, *et al.*, 1995).

## 2.7.2 **Capacidade de interrupção simétrica**

A capacidade de interrupção simétrica do disjuntor é o maior valor de corrente de curto-circuito que o disjuntor é capaz de interromper, considerando a componente simétrica da corrente de falta, e tem o seu valor escolhido entre os vários definidos com base na série R10 (10 – 12,5 – 16 – 20 – 25 – 31,5 – 40 – 50 – 63 – 80 kA, eficaz).

Embora, em uma subestação, alguns disjuntores sejam submetidos a correntes de curto-circuito menores do que outros, é conveniente que todos os disjuntores instalados em um mesmo local tenham a mesma capacidade de interrupção (FRONTIN, 2013). Caso esses

valores nominais sejam ultrapassados, os disjuntores são considerados superados, tema que será estudado no próximo capítulo deste trabalho.

### **2.7.3 Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT)**

Tensão de Restabelecimento Transitória é a diferença de potencial entre os terminais do disjuntor em seguida à interrupção de uma corrente, no período transitório anterior ao amortecimento das oscilações (FRONTIN, 2013), e ela é definida como uma sobretensão.

Essas sobretensões que aparecem no momento da manobra do disjuntor devem ser conhecidas para correta especificação das suportabilidades dos disjuntores para esse tipo de solicitação.

### 3 SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

O aumento da demanda por energia elétrica, tanto de consumidores residenciais quanto pelo crescimento do setor industrial e do comércio, exige a ampliação e recapacitação da matriz energética brasileira em todos seus segmentos, seja de geração, distribuição ou transmissão. O órgão responsável pelo planejamento de expansão do sistema elétrico para sustentar tal evolução é o Ministério de Minas e Energia (MME), subsidiado por estudos elaborados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) enquanto que o Plano de Ampliação e Reforços na Rede Básica (PAR) é atribuição do Operador Nacional do Sistema – ONS (ONS, 2014), com intuito de avaliar as condições de atendimento ao consumo de energia elétrica do ponto de vista do desempenho da rede elétrica e segurança elétrica do suprimento.

Como consequência dessa expansão constante, os níveis de curto-circuito e correntes que fluem no sistema elétrico se elevam, podendo assim ultrapassar os limites de suportabilidade nominal dos equipamentos já existentes na rede. A violação desses limites é chamada de superação de equipamentos. Os principais equipamentos mais propícios à superação são os disjuntores, chaves seccionadoras, bobinas de bloqueio e transformadores de corrente (TC). Neste trabalho, o foco será a superação de disjuntores.

Como a operação de equipamentos em condições acima de seus dados de placa não é normatizada mundialmente (com a exceção de algumas condições de operação de transformadores em sobrecarga), algumas diretrizes e critérios para análise de superação de equipamentos, incluindo disjuntores, foram acordados entre o ONS e os agentes do Sistema Elétrico Brasileiro no documento “Critérios para Análise de Superação de Equipamentos e Instalações de Alta Tensão” (ONS, 2014). Tal documento considera que, para análise de superação de equipamentos, as seguintes grandezas devem ser monitoradas:

- a) corrente de carga;
- b) corrente de curto-circuito (simétrica e assimétrica);
- c) tensão de restabelecimento transitória (TRT);
- d) constante de tempo X/R.

Todas essas grandezas serão assumidas como indicadores de superação de disjuntores.

O processo de análise de superação dos disjuntores por capacidade nominal de equipamentos é parte integrante do Plano de Ampliação e Reforços – PAR, o qual deve ser elaborado pelo ONS e se baseia em um horizonte de três a cinco anos, tendo como objetivo analisar as mudanças devido à expansão do SIN no planejamento de médio prazo (SINDER,



2007). Tal processo se inicia com os estudos de curto-circuito na rede básica e DIT (Demais Instalações de Transmissão), consolidadas no relatório Estudos de Curto-Circuito. Esse relatório anual, elaborado pelo ONS de acordo com o Submódulo 3.12 dos Procedimentos de Rede do ONS (ONS, 2021), contém as informações necessárias para identificar os casos de superação por corrente simétrica de curto-circuito para disjuntores, além de fornecer os valores  $X/R$  calculados para todas as barras do SIN, necessários para efetuar as análises de superação por crista da corrente de curto-circuito (ONS, 2010). Os relatórios de Estudos de Curto-Circuito são disponibilizados pelo ONS no Portal SINtegre<sup>2</sup>.

A maior causa de superação de disjuntores ocorre pelo critério de corrente de curto-circuito simétrica (TRINDADE, 2019). Tendo em vista a existência de uma base de dados, disponibilizada pelo ONS no portal SINtegre, com a informação dos disjuntores de menor capacidade de interrupção simétrica em cada subestação monitorada pelo ONS, os estudos de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica objetivam monitorar a corrente de falta simétrica que passa por cada um desses equipamentos.

A seguir serão apresentadas as metodologias utilizadas pelo ONS e pelos agentes do Sistema Elétrico Brasileiro para a identificação dos disjuntores superados. As metodologias para análise de superações por corrente de carga, TRT, crista corrente de curto-circuito e  $X/R$  serão explicadas de maneira breve, e podem ser vistas em detalhe no documento “Nota Técnica n.º 048/2014 - Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão” (ONS, 2014), enquanto que a metodologia de análise de superação por corrente de curto-circuito simétrica será mais detalhada, devido a maior incidência de superação de disjuntores por essa grandeza, assim como serão apresentadas algumas medidas mitigadoras para diminuição da corrente de curto-circuito simétrica calculada.

### 3.1 METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CARGA

A superação por corrente de carga é caracterizada pela ocorrência de valores de corrente superiores à corrente nominal do equipamento para quaisquer condições operativas

---

<sup>2</sup> A pagina do portal SINtegre pode ser acessada no sítio <https://sintegre.ons.org.br/>

da rede, incluindo contingências da rede e cenários de carga e de geração adotadas no PAR (CARVALHO, SINDER, *et al.*, 2007). O equipamento será considerado superado se:

$$I_{max} > I_n \quad (35)$$

Onde:

$I_{max}$  é a corrente máxima do circuito considerando as premissas do PAR;

$I_n$  é a corrente nominal do equipamento.

### 3.2 METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR TRT

A superação do disjuntor por TRT (Tensão de Restabelecimento Transitório) fica caracterizada pela ultrapassagem dos valores de suportabilidade. O critério básico que determina a necessidade de investigação da superação por TRT é quando a corrente simétrica de curto-circuito passante no disjuntor é superior a 85% da capacidade nominal de interrupção do mesmo (CARVALHO, SINDER, *et al.*, 2007).

A análise de superação por tal critério consiste em determinar a TRT por simulação em regime transitório, utilizando programas como o ATP/EMTP, por exemplo, e a comparar com os valores e envoltórias propostas pela norma pertinente à especificação do disjuntor (ONS, 2014).

Mais detalhes dessa metodologia são encontrados no documento “Nota Técnica n.º 048/2014 - Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão” (ONS, 2014).

### 3.3 METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CRISTA DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO

Esta metodologia consiste no cálculo da crista da corrente de curto-circuito passante e comparação desse valor com o valor de crista da corrente suportável. A crista da corrente de curto-circuito pode ser determinada em função da corrente de curto-circuito simétrica e da constante de tempo da rede, determinada nos estudos de curto-circuito através da seguinte fórmula:

$$I_p = I_{cc}\sqrt{2}(1 + e^{-\frac{tp}{\tau}}) \quad (36)$$

Onde:

$I_p$  é valor de crista da corrente de curto-circuito;

$I_{cc}$  é valor eficaz da corrente de curto-circuito;

$I_n$  é o valor eficaz da corrente de curto-circuito;

$t_p$  é o tempo de crista da corrente de curto-circuito (8,33 ms para 60 Hz);

$\tau$  é o valor da constante de tempo calculada para a barra (L/R).

O equipamento é considerado superado se  $I_p$  for maior do que o valor de crista da corrente suportável pelo equipamento.

### 3.4 METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CONSTANTE DE TEMPO X/R

A superação de disjuntores por X/R é determinada pela análise desse parâmetro juntamente com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica tendo que, o fato de o X/R da rede ultrapassar o X/R especificado do disjuntor não necessariamente leva à superação do equipamento. Existe também um valor de redução associado a cada faixa pré-definida de X/R da rede. O critério definido está apresentado na referência “RE2.1/090-2003 - Critérios para a especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada” (ONS, 2003).

### 3.5 METODOLOGIA DE SUPERAÇÃO POR CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICA

Disjuntores são considerados superados por corrente de curto-circuito simétrica quando a corrente de curto-circuito simétrica ultrapassa o valor das capacidades de interrupção simétrica do disjuntor. Nos parágrafos seguintes serão apresentados os passos que o ONS utiliza para análise de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica.

Primeiramente, deve-se escolher o caso base de estudo no horizonte do PAR, do programa ANAFAS (CEPEL), utilizado para cálculo de correntes de curto-circuito, casos estes que estão disponibilizados pelo Operador Nacional do Sistema no Portal SINtegre. Tal

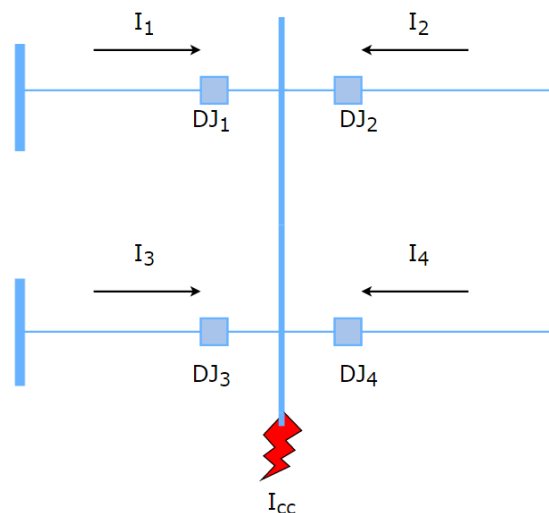
caso deve conter toda a modelagem da rede a ser analisada. Algumas alterações e atualizações no caso base podem ser necessárias dependendo do tipo de estudo que está sendo feito.

Após a escolha do caso base e atualizações, deve-se usar o programa ANAFAS (CEPEL) para cálculo das correntes de curto-circuito e, principalmente, os níveis de curto-circuito das barras. Níveis de curto-circuito das barras são definidos, no âmbito deste trabalho, como a corrente que passa em um barramento caso seja aplicada uma falta nele mesmo. As faltas analisadas são dos tipos monofásicas, trifásicas e bifásicas-terra, e elas devem ser calculadas para todas as barras do sistema analisado.

Na etapa seguinte, deve-se comparar os níveis de curto-circuito calculados das barras com o menor valor da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores destes mesmos barramentos. Caso a relação entre a maior corrente de falta em um barramento (seja falta monofásica, trifásica ou bifásica) e a sua menor capacidade de interrupção simétrica for menor do que 100%, a subestação não tem disjuntores superados. Porém, caso essa relação atingir um valor maior ou igual a 100% deve ser efetuado um estudo mais detalhado, pois isso é um indicativo de superação de disjuntores. Chama-se essa análise mais detalhada por estudo de corrente passante ou *line-out*, o qual consiste no cálculo da corrente que efetivamente passará por cada disjuntor da subestação, e não só o nível de curto-circuito do barramento. Nesse tipo de estudo são consideradas três situações, que serão descritas a seguir.

A primeira situação analisada é uma situação de curto-circuito no próprio barramento, sendo observadas as contribuições de cada circuito conectado a ele, como é visto na Figura 28.

Figura 28 – Representação de uma falta no barramento.



Fonte: Autor (2021).

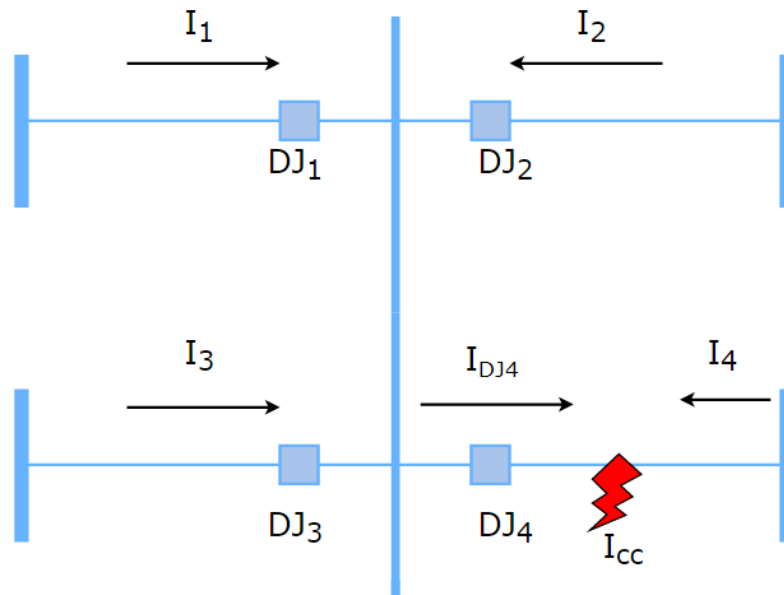
Observa-se que a corrente de curto-circuito  $I_{cc}$  é dada por:

$$I_{cc} = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 \quad (37)$$

Nesse caso a corrente do disjuntor é a própria corrente do vão em que ele está instalado, por exemplo, o disjuntor número 4 (DJ<sub>4</sub>) tem uma corrente passando por ele de  $I_4$ .

Na segunda situação aplica-se um curto-circuito no início de cada circuito conectado ao barramento, ou seja, na saída de linha após o disjuntor, como mostrado na Figura 29. Nesse caso, observa-se a corrente passante que percorre o disjuntor em questão.

Figura 29 – Representação de uma falta na saída de linha.



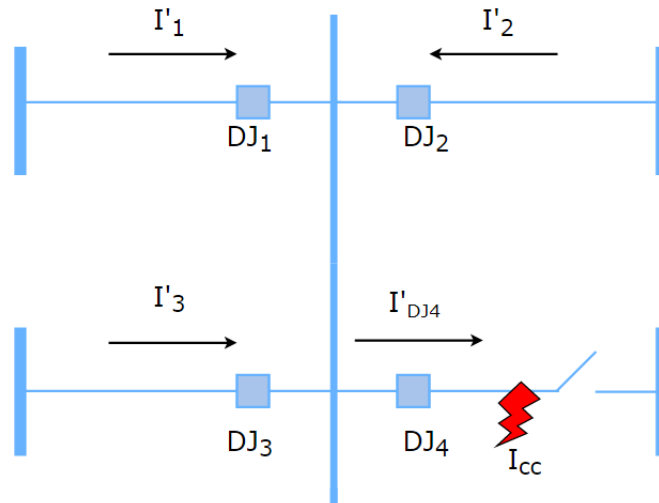
Fonte: Autor (2021).

Observa-se que a corrente de curto-circuito ( $I_{cc}$ ) ainda é igual à da situação anterior, porém a corrente que passa pelo disjuntor número 4 ( $I_{DJ4}$ ) agora pode ser descrita com a seguinte equação:

$$I_{DJ4} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (38)$$

Em seguida, para a terceira situação, aplica-se um curto-circuito na saída da linha que contém o disjuntor em questão mais uma vez, porém agora considerando aberto o terminal remoto da linha sob falta, conforme mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Representação de uma falta na saída de linha com o terminal remoto aberto.



Fonte: Autor (2021).

Nessa situação a corrente de curto-circuito é dada por:

$$I_{cc} = I'_{DJ4} = I'_1 + I'_2 + I'_3 \quad (39)$$

Essa condição é chamada de *line-out*, e geralmente representa a pior condição entre as situações mostradas acima.

No estudo completo de corrente passante, as três condições mostradas anteriormente devem ser feitas para cada disjuntor conectado ao barramento em questão, e a corrente passante em cada um desses disjuntores deve ser analisada e comparada com a sua capacidade de interrupção simétrica. Caso a relação entre a corrente passante e a capacidade de interrupção simétrica do respectivo disjuntor atinja um valor igual ou superior a 100%, o disjuntor deve ser considerado em estado “superado”. Se essa relação atingir um valor igual ou superior a 90% e inferior a 100%, o disjuntor é considerado em estado de “alerta”. Se a mesma relação for inferior a 90%, o disjuntor é considerado “não superado” (ONS, 2021).

A superação de disjuntores pode ser seguida da substituição dos mesmos, porém em caso de superação generalizada, em uma determinada subestação, deverão ser analisadas

medidas técnicas e econômicas para limitação do nível de curto-circuito da instalação. Essas medidas são conhecidas como medidas mitigadoras.

As medidas mitigadoras podem tomar algumas formas diferentes, dependendo do caso de estudo. Podem ser medidas sistêmicas ou medidas aplicadas diretamente no equipamento superado (ONS, 2014).

As medidas de caráter sistêmico são mais comumente adotadas para mitigação da superação de equipamentos, e visam aumentar as impedâncias de sequência com algumas alterações na rede. Tais medidas podem compreender, segundo (CARVALHO, SINDER, *et al.*, 2007):

- a) seccionamento de barramentos, com ou sem o uso de reatores limitadores de curto-circuito;
- b) reatores limitadores de corrente (RLC) em série com transformadores ou linhas de transmissão;
- c) chaveamento sequencial em subestação com superação de um disjuntor específico;
- d) geradores e transformadores de reatância mais elevada;
- e) *by-pass* de linha de transmissão em subestação, que evita a contribuição de tal linha para a alimentação da falta.

Outras soluções de tecnologia mais complexa também podem ser aplicadas, tais como uso de eletrônica de potência, limitadores de corrente que utilizem tecnologia de supercondutores ou elos de corrente contínua segundo (CARVALHO, SINDER, *et al.*, 2007), porém seu uso ainda é restrito devido ao alto custo financeiro ou falta de conhecimento prévio dos efeitos de tais soluções no sistema brasileiro.

Já as medidas mitigadoras feitas através de intervenção direta no equipamento podem ser, também segundo (CARVALHO, SINDER, *et al.*, 2007), as seguintes:

- a) *uprating* (reclassificação): atualização das características elétricas nominais do equipamento;
- b) *upgrading* (repotencialização): aumento da capacidade nominal através de modificações no projeto;
- c) *overhaul* (revisão geral): assegura que as características e capacidade do equipamento ainda são as mesmas que em seu estado novo, sem alterá-las;
- d) *retrofit* (adaptação): grandes modificações para sua repotencialização.

#### **4 ENTRADA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS E SEUS IMPACTOS NOS NÍVEIS DE CURTO-CIRCUITO DO SISTEMA NACIONAL INTERLIGADO**

Como foi apresentado no capítulo 3 deste trabalho, o sistema elétrico brasileiro cresce de acordo com o crescimento da demanda energética do país. Esse crescimento deve ser feito de forma regulada, seguindo regras, de maneira que os estudos e estratégias de expansão são organizados por órgãos ligados ao governo. Essa expansão é apresentada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), no Programa de Expansão da Transmissão (PET)/Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP)<sup>3</sup> e no Plano Decenal (PD), e pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), no Plano de Ampliação e Reforços (PAR).

O PET é elaborado após estudos de planejamento de longo prazo e o PAR é elaborado após estudos das necessidades de curto prazo da rede elétrica, e indicam quais subestações e linhas de transmissão são necessárias para a prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica pela Rede Básica, que é definida como a rede constituída por todas as subestações e linhas de transmissão de 230 kV ou tensão superior de concessões de serviços públicos de energia elétrica de acordo com a Resolução ANEEL n° 245 (ANEEL, 1998).

Os relatórios PAR e PET, provenientes de estudos de curto e longo prazo, são, então, analisados e consolidados pelo Ministério de Minas Energia (MME), o que resulta em um conjunto de empreendimentos de transmissão, necessário para o atendimento da geração e da carga do SIN, o Sistema Interligado Nacional.

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que regula e fiscaliza o setor elétrico brasileiro, prepara os editais dos leilões de novas instalações de transmissão com base nas informações citadas no parágrafo anterior. Nesse processo os agentes de transmissão são os responsáveis pelos investimentos e os agentes de distribuição são os responsáveis pela compra e contratação de parcelas de energia. Realizados os leilões e definidos os vencedores, estes deverão assinar, então, os respectivos contratos de concessão (FRONTIN, 2013).

A entrada de cada um desses empreendimentos deve estar de acordo com uma cronologia do plano de expansão da transmissão, estabelecida pelos condicionantes de curto prazo determinados pelas solicitações de acesso, ampliações, reforços e melhorias, bem como as variações nas previsões de carga que não tenham sido consideradas pelo planejamento da

---

<sup>3</sup> O PET tem caráter determinativo abrangendo o horizonte de seis anos, o PELP tem caráter indicativo e contempla as instalações recomendadas para entrar em operação a partir do sétimo ano.



expansão de geração e transmissão pela EPE. Cabe ao ONS adequar a entrada dos empreendimentos com essa cronologia e, durante esse processo, avaliar o impacto sistêmico da entrada desses empreendimentos no sistema elétrico brasileiro, através de estudos elétricos e energéticos, incluindo estudos de curto-circuito que avaliam os impactos da integração de novos empreendimentos nos níveis de curto-circuito nos barramentos do SIN.

Neste capítulo será estudado primeiramente, de maneira superficial, o papel da Empresa de Pesquisa Energética no planejamento de expansão da transmissão através do PET/PELP e relatórios desenvolvidos pela própria EPE e pelos agentes do sistema elétrico brasileiro, e será dado um foco maior nos estudos de curto-circuito elaborados pelo ONS para avaliar os impactos que os novos empreendimentos do sistema elétrico brasileiro têm nos níveis de curto-circuito dos barramentos do SIN.

#### 4.1 A EPE NO PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DA TRANSMISSÃO

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), dentro do setor elétrico, faz o planejamento da expansão de longo prazo a partir de estudos e pesquisas que levam em conta premissas demográficas, taxas de crescimento econômico, consumo de energia elétrica, geração de energia elétrica, evolução tecnológica, etc. Tal estudo é de extrema complexidade e não envolve somente estudos elétricos, como também considera aspectos econômicos, sociais e ambientais, se tornando assim, multidisciplinar.

Como produto desse processo, a EPE elabora o documento chamado Programa de Expansão da Transmissão, o PET/PELP, que juntamente com o PAR, organizado pelo ONS, indicam quais subestações e linhas de transmissão são necessárias para a prestação dos serviços de transmissão de energia elétrica pela Rede Básica. É importante salientar que as obras apresentadas no PET são periodicamente avaliadas e consolidadas pelo MME, considerando-se ainda as informações dispostas nos estudos do ONS, no sentido de estabelecer o conjunto de instalações que deverá seguir para o processo de outorga. Esse processo pode ser conduzido via licitação de novas concessões ou por meio de autorização de execução às empresas já detentoras de outorga (EPE, 2018).

Para a licitação de uma nova instalação de transmissão integrante da rede básica, a documentação necessária é composta especificamente por cinco relatórios técnicos denominados R1, R2, R3, R4 e R5:

- a) o relatório R1 demonstra a viabilidade técnico-econômica e socioambiental da nova instalação;
- b) o relatório R2 apresenta o detalhamento técnico da obra;
- c) o relatório R3 apresenta a diretriz de traçado para as linhas de transmissão e localização das subestações, bem como a análise socioambiental associada;
- d) o relatório R4 define os requisitos dos sistemas circunvizinhos, de forma a assegurar o adequado compartilhamento entre as instalações existentes e a nova obra;
- e) o relatório R5 apresenta a estimativa dos custos fundiários referentes à região onde a nova instalação será implantada.

O relatório R1 é feito pela própria EPE, e o restante dos relatórios são solicitados pelo MME às empresas do setor elétrico, as quais serão ressarcidas posteriormente pelos vencedores dos leilões nos quais tais obras são licitadas (EPE, 2018).

De forma resumida, o processo de licitação de novos empreendimentos de transmissão se dá da seguinte maneira: é feita a identificação da necessidade de expansão da rede através dos estudos de planejamento (EPE e ONS), então, a EPE realiza estudos de viabilidade técnico-econômica e socioambiental selecionando a alternativa mais viável no relatório R1 e encaminha ao MME, que solicita aos agentes do setor elétrico brasileiro a elaboração dos demais relatórios (R2, R3, R4 e R5). Na posse de todos esses relatórios, o MME encaminha-os para a ANEEL, que, com base nas informações presentes nos próprios relatórios, realiza o leilão de transmissão associado aos empreendimentos citados nos estudos.

#### 4.2 ESTUDOS DE CURTO-CIRCUITO REFERENTES AO IMPACTO DA ENTRADA DE NOVOS EMPREENDIMENTOS NO SIN

As empresas vencedoras do leilão devem atender às premissas, aos estudos e aos requisitos mínimos presentes nos editais do leilão, Procedimentos de Rede do ONS e relatórios R1 a R5 da EPE através do projeto de sua instalação vencedora, até o momento e depois que passa a operar no sistema.

É de responsabilidade do ONS, em cumprimento às atribuições estabelecidas no Submódulo 7.4 dos Procedimentos de Rede (ONS, 2021), a realização de estudos que respaldem a entrada em operação dos novos empreendimentos no sistema elétrico. A

avaliação do impacto do novo empreendimento nos níveis de curto-circuito da rede elétrica brasileira faz parte desse estudo.

Com base nas informações e dados enviados pelo agente detentor do novo empreendimento, o ONS consolida esses dados, e a partir dos casos de referência presentes na sua base de dados elabora os estudos necessários para avaliação dos impactos do empreendimento no SIN.

No caso de estudos de curto-circuito, é função do Operador Nacional do Sistema avaliar a evolução nos níveis de curto-circuito em cada uma das barras do SIN, bem como avaliar a capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores pertencentes às instalações de transmissão sob responsabilidade de concessionárias de transmissão localizados na área de influência da nova instalação. Os métodos de avaliação de superação de disjuntores foram estudados no capítulo 3 deste trabalho.

Referente à avaliação da evolução dos níveis de curto-circuito, uma vez calculados os níveis de curto-circuito nos barramentos do sistema, o ONS verifica a evolução dos níveis de curto-circuito nas barras localizadas na área de influência da nova instalação, e, caso a inclusão dessa instalação implique variação no nível de curto-circuito de 10% ou maior, o ONS alerta os agentes de operação envolvidos para que, caso necessário, promovam ajustes nos relés de proteção (ONS, 2021).

Tais estudos de curto-circuito devem ser feitos de acordo com Submódulo 3.12 dos Procedimentos de Rede do ONS (2021) seguindo os critérios e requisitos do Submódulo 2.3 dos Procedimentos de Rede do ONS (2021). A seguir será explicado como o Operador Nacional do Sistema efetua os estudos de curto-circuito para analisar os impactos da entrada de um novo empreendimento de transmissão nos níveis de curto-circuito do SIN, sob o ponto de vista da evolução dos níveis de curto-circuito dos barramentos e superação de disjuntores.

#### **4.2.1 Metodologia de estudos para análise de impactos nos níveis de curto-circuito**

A análise do impacto causado pela entrada de um novo empreendimento de transmissão nos níveis de curto-circuito das subestações do SIN deve ser feita através da avaliação da evolução dos níveis de curto-circuito nos barramentos do sistema e a comparação desses níveis com a menor capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores pertencentes às instalações de transmissão, sob responsabilidade de concessionárias de transmissão,

localizados na área de influência da nova instalação. Esse tipo de análise segue alguns passos para efeitos de padronização de estudos, que estão apresentados nos parágrafos seguintes.

Antes de começar o estudo de curto-circuito em si, define-se o caso base a ser utilizado, nos formatos compatíveis com os já utilizados pelo setor, que para estudos de curto-circuito é usado o ANAFAS. Os casos base fazem parte da base de dados do ONS, disponibilizados no portal SINtegre, e a escolha será feita no horizonte do PAR, isto é, o responsável pelo estudo deve escolher o caso base referente ao ano de entrada do empreendimento a ser estudado. Se o empreendimento em questão é uma subestação com entrada prevista para Junho de 2022, por exemplo, deve-se utilizar o caso base referente ao ano de 2022. Caso o estudo esteja sendo feito no mesmo ano de entrada do empreendimento, apenas alguns meses antes da integração, escolhe-se o caso da base de dados em operação, que seria o caso referente à configuração atual (ao momento do estudo) do SIN.

Escolhido o caso base a ser trabalhado, deve-se fazer ajustes dentro desse caso, utilizando dados fornecidos pela transmissora proprietária do empreendimento em questão. No caso de estudos pré-operacionais, que são os estudos feitos pelo ONS meses antes da entrada de tal empreendimento e estão descritos na referência “Procedimento de Rede - Módulo 7 - Submódulo 7.4 - Estudos pré operacionais de integração de instalações da Rede de Operação” (ONS, 2021), os dados fornecidos ao ONS já devem ser os dados reais dos equipamentos já comprados e que serão instalados.

Observa-se que, em alguns cenários, o empreendimento de interesse já existe dentro do caso base, logo podem ser feitos apenas alguns ajustes de parâmetros. Em outras circunstâncias, o empreendimento em questão ainda não está modelado no caso escolhido, logo, é necessário adicionar o empreendimento completo com todas as obras relacionadas a ele. Muitas vezes, para análise completa e correta, são considerados outros empreendimentos entrando em conjunto com o que é objeto do estudo. Isso é feito para que na simulação e análise sejam estudados casos mais próximos da realidade. É comum que a entrada de empreendimentos vizinhos juntamente com o empreendimento de interesse afete de maneira crítica os resultados das simulações.

Como citado anteriormente, a análise do impacto nos níveis de curto-circuito referente à entrada da nova instalação é feita através de uma comparação. Essa comparação é feita entre dois cenários: antes da entrada do empreendimento e depois da entrada do empreendimento. No primeiro caso, antes da entrada, retira-se o empreendimento em questão do cenário e no segundo caso, depois da entrada, é feita a análise do sistema completo, já com

o novo empreendimento em operação. Com isso, tem-se dois casos separados, e assim é possível realizar uma análise comparativa.

Utilizando o programa ANAFAS (CEPEL), são calculados nos barramentos os níveis de curto-circuito monofásicos, bifásicos e trifásicos. Isso deve ser feito tanto no primeiro caso, sem o novo empreendimento, quanto no segundo caso, já com o novo empreendimento em questão.

O próximo passo é analisar qual é a evolução no nível de curto-circuito em cada barramento. Geralmente, as maiores evoluções ocorrem nas instalações mais próximas ao empreendimento que está entrando em operação.

Deve-se também comparar os níveis de curto-circuito calculados nas barras, com o menor valor da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores dos mesmos barramentos para analisar se existe superação de disjuntor, utilizando o processo estudado no capítulo 3 deste trabalho sob o ponto de vista da superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica.

Os resultados desse estudo devem apresentar em quais barramentos foram verificadas evoluções acima de 10%, valor proveniente da comparação entre o caso sem o novo empreendimento e o caso com o novo empreendimento, e se existe algum disjuntor superado em alguma das barras monitoradas pelo ONS.

No capítulo seguinte, será feito um estudo de curto-circuito em um caso real, utilizando a base de dados do ONS e informações presentes em relatórios R1 da EPE, em que serão analisadas as evoluções nos níveis de curto-circuito dos barramentos do SIN e se existe superação de disjuntores com a entrada de um empreendimento de transmissão. Este estudo será feito de acordo com as metodologias explicadas nos capítulos 3 e 4 deste trabalho.

## 5 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo será elaborado um estudo de caso de curto-circuito para analisar o impacto da entrada de um empreendimento de transmissão no Sistema Interligado Nacional (SIN) utilizando os métodos estudados nos capítulos 3 e 4 deste trabalho. Serão analisadas as evoluções nos níveis de curto-circuito dos barramentos do SIN, bem como será feito o processo de análise de superação dos disjuntores por capacidade nominal através dos níveis encontrados.

### 5.1 DESCRIÇÃO DO CASO ANALISADO

O caso analisado será o da entrada da subestação 230/138/69 kV Tubarão Sul. Esse é um empreendimento de transmissão de responsabilidade da EDP Transmissão Litoral Sul S.A., vencedora do leilão nº 013/2015 1ª Etapa – Lote Q da ANEEL (G1, 2016). O empreendimento consiste em uma subestação com um transformador 230/138 kV de 150 MVA e dois transformadores de 230/69 kV de 150 MVA.

O sistema de atendimento elétrico ao mercado do sul de Santa Catarina é subdividido em duas regiões geoeletricas: região Sul e região Extremo Sul. Segundo a referência “Estudos para a licitação da expansão da transmissão - Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1” (EPE, 2013), a região Sul possuía uma demanda de aproximadamente 220 MW, na data em que foi confeccionado o relatório, concentrada principalmente nos municípios de Tubarão, Imbituba, Braço do Norte e Sangão. O atendimento elétrico desta região, na data em que o estudo citado foi confeccionado, é feito basicamente pela subestação Jorge Lacerda nas transformações 230/138 kV, 230/69 kV e 138/69 kV, e pelas linhas de 138 kV que a interligam com as regiões de Florianópolis e Planalto Catarinense. Destaca-se também o complexo termoeletrico Jorge Lacerda, que possui capacidade de geração de 857 MW e que opera tanto por razões elétricas quanto energéticas (EPE, 2013).

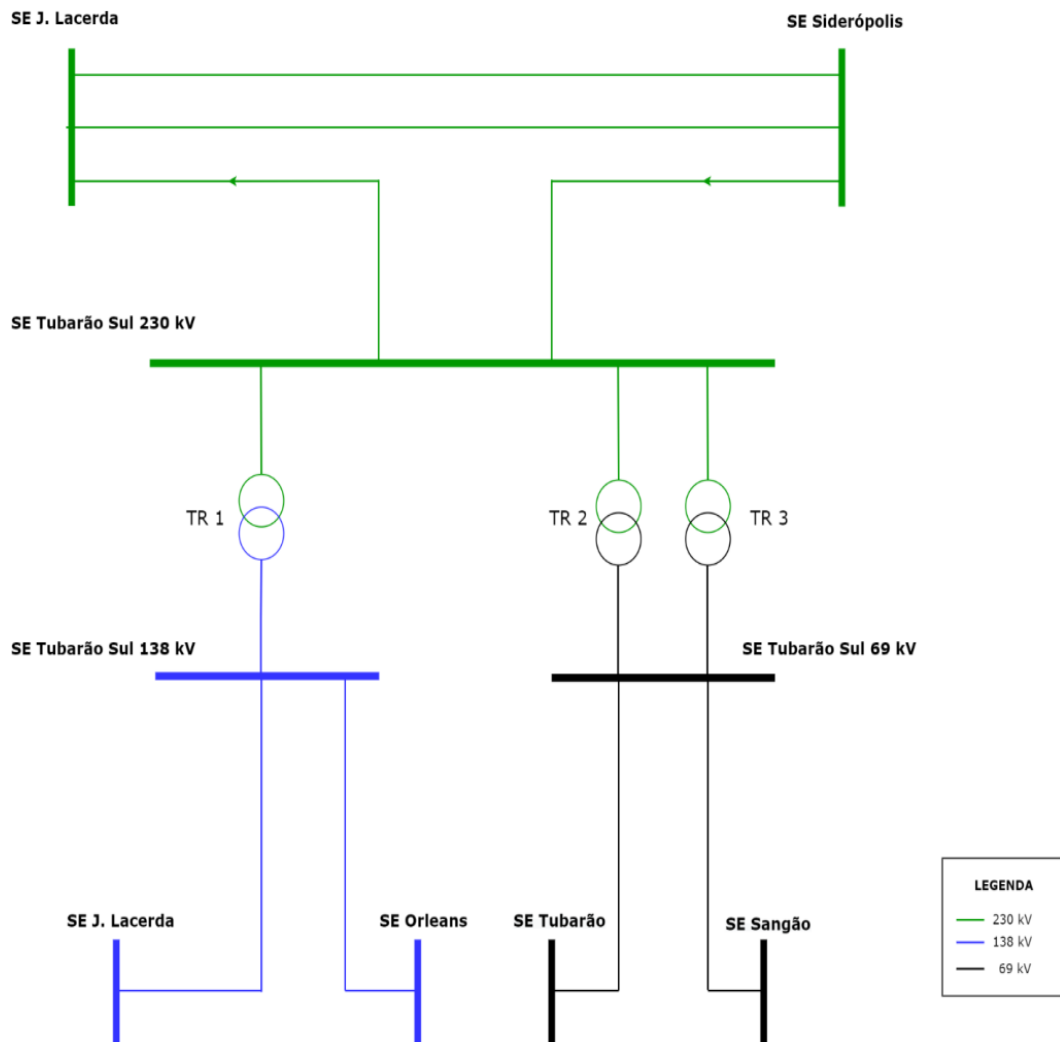
Os estudos de planejamento que originaram o relatório R1 citado (EPE, 2013) apontaram que, em determinadas condições de despacho da usina de Jorge Lacerda, a SE Jorge Lacerda, sendo “SE” uma abreviação comumente utilizada para substituir a palavra “Subestação”, apresenta sobrecarga nas transformações 230/138 kV e 230/69 kV, em situação de emergência. O estudo também aponta que sobrecargas em regime normal podem acontecer no horizonte de estudos.

A fim de reduzir a sobrecarga desses transformadores e também diminuir a dependência da malha de transmissão da região Sul do país em relação à operação da UTE Jorge Lacerda, o estudo realizado pela EPE em 2013 (EPE) indicou a implantação da nova subestação denominada SE Tubarão Sul RB, dotada das relações de transformação 230/138 kV, 230/69 kV, localizada no sul do município de Tubarão.

A SE 230/138/69 kV Tubarão Sul, com ano de entrada previsto para 2021, será conectada ao SIN através do seccionamento da LT 230 kV Jorge Lacerda B – Siderópolis C3, sendo “LT” uma abreviação comumente utilizada para substituir o termo “Linha de Transmissão”. Em um primeiro momento, a tomada de carga será dada através do seccionamento da LT 69 kV Sangão – Tubarão e através do seccionamento da LT 138 kV Jorge Lacerda (Capivari) – Orleans.

A configuração da subestação analisada é dada na Figura 31.

Figura 31 – Representação da SE Tubarão Sul.  
**SE 230/138/69 kV Tubarão Sul**



Fonte: Autor (2021).

## 5.2 PREMISSAS E CASO BASE

Para a realização do estudo de impacto da entrada em operação da subestação Tubarão Sul nos níveis de curto-circuito nos barramentos do SIN e análise de superação de disjuntores utilizou-se o programa ANAFAS (CEPEL). Deve-se escolher um caso base do ANAFAS para início do estudo, logo, o caso escolhido foi o de nome “BR2012A”, sendo este a última base de dados de operação para estudos de curto-circuito disponibilizada pelo ONS no portal SINtegre.



### 5.3 ALTERAÇÕES NO CASO BASE

Como foi explicado no capítulo anterior, após a escolha do caso base devem ser feitas as alterações necessárias nele para representação do sistema final. O caso base escolhido não contém a subestação Tubarão Sul, logo se insere tal subestação através de alterações feitas nesse caso. Os parâmetros das linhas a serem conectadas e dos transformadores da subestação já consolidados devem ser fornecidos ao ONS pela transmissora, porém, por motivos legais, não serão usados tais parâmetros reais neste trabalho.

Os parâmetros utilizados para inserção da subestação Tubarão Sul no caso base escolhido serão retirados dos casos de referência de planejamento para estudos de curto-circuito e também dos arquivos de alteração dos casos de curto-circuito, ambos disponibilizados pelo ONS no portal SINtegre, de forma que esses também foram disponibilizados pelos agentes envolvidos em algum momento após a realização dos leilões, através de projetos básicos ou solicitações de acesso, porém ainda podem não ser dados consolidados, isto é, não são os parâmetros reais dos equipamentos que entrarão em operação.

As alterações citadas no parágrafo acima devem ser feitas na extensão “.alt” através do editor de texto EditCepel (CEPEL). Esse editor permite criar códigos de alteração nos casos do ANAFAS, adicionando novos equipamentos ou alterando parâmetros dos já existentes. A primeira parte do código a ser criado deve conter todos os barramentos da SE Tubarão Sul (incluindo os de 13,8 kV), os transformadores 230/69 kV e o transformador 230/138 kV.

Figura 32 – Fragmento 1 do código que insere a SE Tubarão Sul no caso BR2012A.

```

018  □ DBAR
019  (-----Dados de Barra-----)
020  (NB  CEM      BN      VPRE ANG VBAS DISJUN      DDMMAAADMMMAAAA IA SA
021  (-----)
022  1063      TUBA-S-SC230      230      52
023  1064      TUBA-S-SC138      138      53
024  1065      TUBA-S-SC069      69      53
025  43819  1 TBS--3-SC000      52
026  43820      TBS--3-SC013      13.8      52
027  43821  1 TBS--1-SC000      52
028  43822      TBS--1-SC013      13.8      52
029  43823  1 TBS--2-SC000      52
030  43824      TBS--2-SC013      13.8      52
031  99999
032  □ DCIR
033  (-----Dados de Circuitos-----)
034  (BF  CE  BT   NCT  R1   X1   R0   X0   CN   S1   S0   TAP  TB   TCIA DEFE KM
035  (-----)
036  ( SECCIONAMENTO DA LT 230 kV JORGE LACERDA - SIDEROPOLIS C3, DISTANTE 19.0 km DA SE
037  ( 1010  1057  3L0.94144.8431 3.72410.733IESUL      15      50
038  1010E  1057  3L
039  ( LT 230 kV JORGE LACERDA - TUBARÃO SUL, 28.0 km
040  1010  1063  1L 0.277 1.941 1.208 4.610NOVO      998      21.3
041  ( LT 230 kV TUBARÃO SUL - SIDEROPOLIS, 40.0 km
042  1063  1057  1L 0.471 3.306 2.057 7.854NOVO      998      36.3
043  ( TR 230/138 kV - 150 MVA
044  1063  43819  1T 0.052 9.785 0.052 4.511NOVO      998      YN
045  1064  43819  1T 0.111-1.353 0.111 2.741NOVO      998      YN
046  43820  43819  1T 1.79681.497 1.79650.531NOVO      998 30      D
047  ( TRS 230/69 kV - 2 x 150 MVA
048  1063  43821  1T 0.156 9.7910.156 6.621 NOVO      998      YN
049  1065  43821  1T 0.042-1.0540.042 1.543 NOVO      998      YN
050  43822  43821  1T 1.66736.7261.667 20.979NOVO      998 30      D
051  1063  43823  2T 0.156 9.8010.156 6.621 NOVO      998      YN
052  1065  43823  2T 0.044-0.9900.044 1.543 NOVO      998      YN
053  43824  43823  2T 1.67136.7161.671 20.979NOVO      998 30      D
054  99999

```

Fonte: Autor (2021), captura de tela do EditCepel.

Na Figura 32, também já é feito o seccionamento da LT 230 kV Jorge Lacerda – Siderópolis na SE Tubarão Sul, através da eliminação desta e criação de duas novas linhas LT 230 KV Jorge Lacerda – Tubarão Sul e LT 230 kV Tubarão Sul – Siderópolis.

O próximo passo é fazer a tomada de carga nos setores 138 kV e 69 kV através do seccionamento na SE Tubarão Sul da LT 69 kV Sangão – Tubarão e através do seccionamento da LT 138 kV Jorge Lacerda – Orleans. Como o caso base também não contém as subestações 69 kV Tubarão 2, Jaguaruna Velha e Sangão, deve-se inserir essas subestações no caso base, com suas respectivas conexões. Novamente são utilizados parâmetros de casos da base do ONS de anos futuros à data de entrada do empreendimento. A Figura 33 mostra o fragmento do código do EditCepel que faz as alterações citadas neste parágrafo.

Figura 33 – Fragmento 2 do código que insere a SE Tubarão Sul no caso BR2012A.

```

063 (////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////)
064 ( OBRAS NO 69 E 138 KV REFERENTE A NOVA SE TUBARÃO SUL
065 (////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////)
066 □ DBAR
067 (-----Dados de Barra-----)
068 (NB  CEM      BN      VPRE ANG VBAS DISJUN      DDMMAAAADDMMAAAA IA SA
069 (-----)
070 9981  TUBAR2-SC069      69      53
071 9978  JAGUAR-SC069      69      53
072 9980  SANGAO-SC069      69      53
073 99999
074 □ DCIR
075 (-----Dados de Circuitos-----)
076 (BF  CE  BT   NCT  R1   X1   R0   XO   CN   S1   S0   TAP  TB  TCIA DEFE  RM  CD
077 (-----)
078 (Sangao - Jaguarao
079 9980 A 9978   1 L 3.21  9.7   3.21  9.7  NOVO      998   16
080 (Jarguarao - Tubarao 2
081 9978 A 9981   1 L 6.85  10.16 6.85  10.16NOVO      998   16
082 (Tubarao 2 - Tubarao
083 9981 A 2875   1 L 6.83  10.11 6.83  10.11NOVO      998   16
084 99999
085 □ DCIR
086 (-----Dados de Circuitos-----)
087 (BF  CE  BT   NCT  R1   X1   R0   XO   CN   S1   S0   TAP  TB  TCIA DEFE  RM  CD
088 (-----)
089 ( REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CELESC SETOR DE 69 kV
090 (INCLUSÃO DA LT TUBARAO SUL - SANGÃO
091 1065 9980   1L5.900 19.18 10.21038.800NOVO      998   16
092 (INCLUSÃO DA LT TUBARAO SUL - TUBARAO
093 1065 2875   1L4.980 16.12 8.110035.090NOVO      998   10.1
094 ( REDE DE DISTRIBUIÇÃO DA CELESC SETOR DE 138 kV
095 (EXCLUSÃO DA LT J.LACERDA - ORLEANS
096 1007 E 2821   1L
097 (INCLUSÃO DA LT TUBARAO SUL - ORLEANS
098 1064 2821   1L4.342710.86710.37037.580NOVO      998   43.3
099 (INCLUSÃO DA LT TUBARAO SUL - J.LACERDA
100 1064 1007   1L3.59009.58006.345023.000NOVO      998   26.5
101 99999

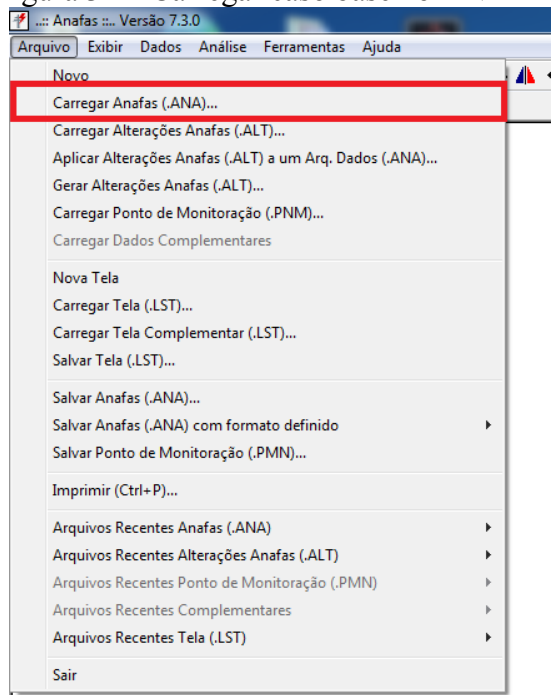
```

Fonte: Autor (2021), captura de tela do EditCepel.

Vale lembrar que os parâmetros utilizados podem não ser os parâmetros definitivos do empreendimento, porém são valores oficiais disponibilizados pelo ONS em sua base de dados.

Para que as alterações apresentadas na Figura 32 e na Figura 33 sejam feitas no caso base que será estudado, abre-se, primeiro, o caso base desejado no ANAFAS escolhendo no programa a opção “Arquivo” e depois “carregar Anafas (.ANA)...” como mostra a Figura 34. Assim, seleciona-se no sistema o caso base desejado.

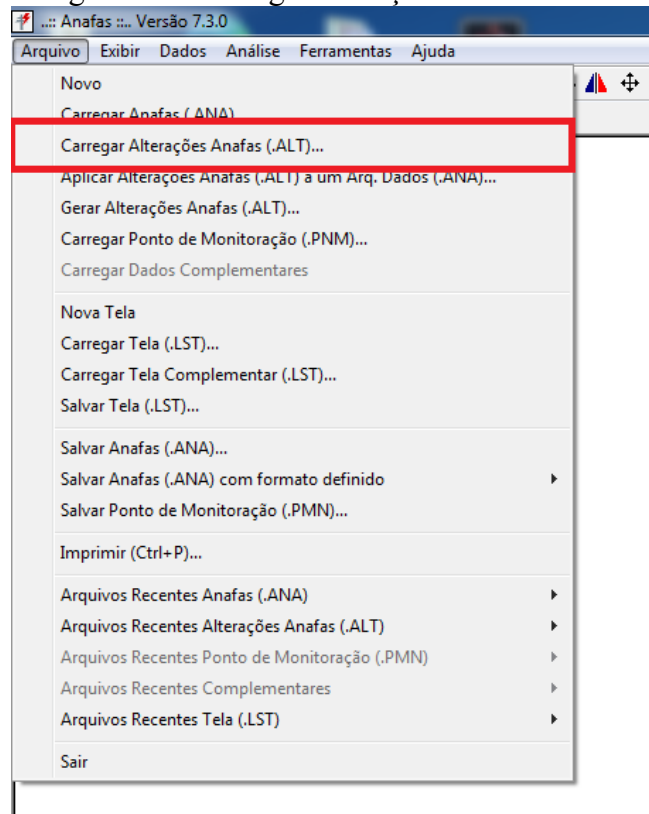
Figura 34 – Carregar caso base no ANAFAS.



Fonte: Autor (2021), captura de tela do ANAFAS.

A seguir, para adicionar as alterações desejadas ao caso base, deve-se clicar na opção “Carregar Alterações Anafas (.ALT)...” e escolher o arquivo de alteração com a extensão “.alt” que coloca o empreendimento em questão no caso base escolhido para o estudo. A Figura 35 mostra o processo descrito nesse parágrafo.

Figura 35 – Carregar alterações no ANAFAS.



Fonte: Autor (2021), Captura de tela do ANAFAS.

Feitas essas alterações, temos o nosso caso final, isto é, o cenário do sistema elétrico após a entrada do empreendimento em questão (SE Tubarão Sul) e também o caso antes da entrada do empreendimento em questão, que seria o próprio caso base “BR2012A” escolhido no início do estudo.

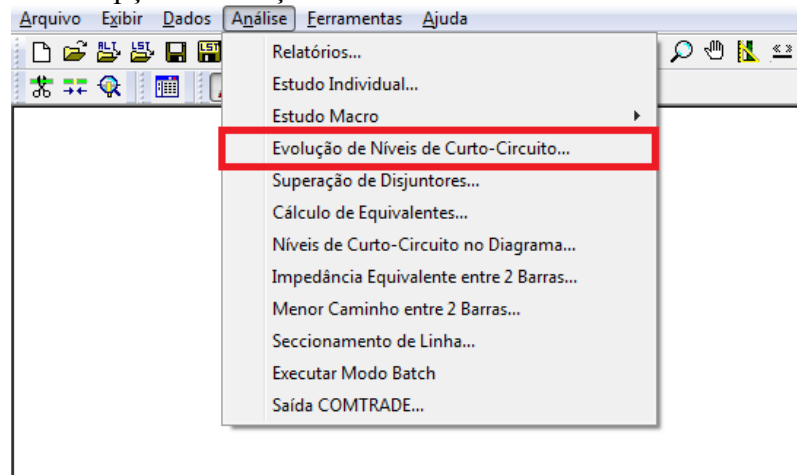
#### 5.4 SIMULAÇÃO DOS CASOS

Na posse dos dois casos (antes da entrada de Tubarão Sul e após a entrada de Tubarão Sul) necessários para os estudos de impactos da entrada da subestação Tubarão Sul nos níveis de curto-circuito dos barramentos do SIN, calcula-se agora, utilizando o programa ANAFAS (CEPEL), os níveis de curto-circuito trifásicos, monofásicos e bifásicos em ambos os casos. Esses cálculos são feitos pra toda vizinhança da subestação Tubarão Sul.

O cálculo da evolução dos níveis de curto-circuito no ANAFAS por ser feito separadamente para cada barramento ou escolhendo as opções “análise” e então “Evolução nos Níveis de Curto-Circuito”. A segunda opção é mais prática, pois já calcula os níveis de curto-circuito nos dois casos necessários para o estudo, e também calcula a evolução em cada

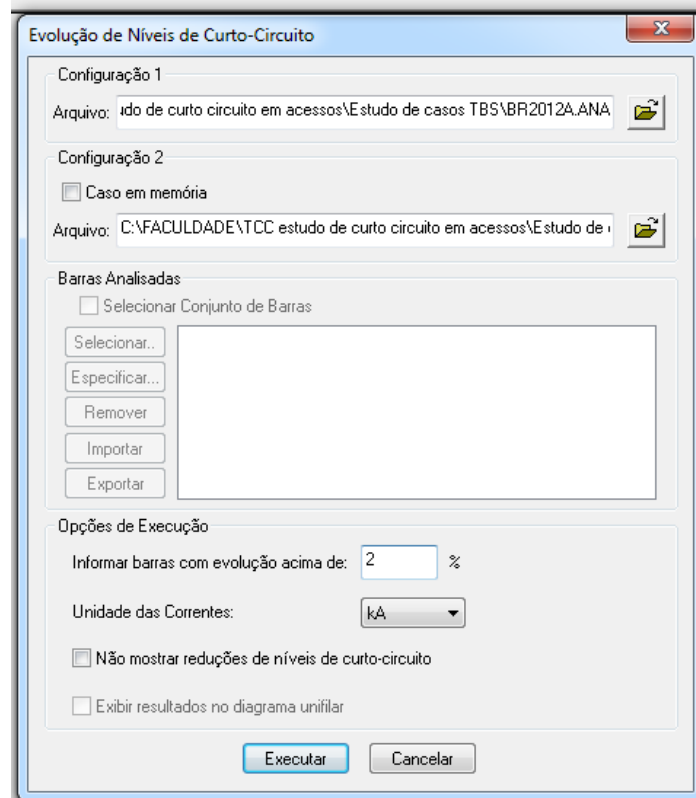
barramento. Na Figura 36 e na Figura 37 é mostrado o processo descrito nesse mesmo parágrafo.

Figura 36 – Opção “Evolução de Níveis de Curto-Circuito” no ANAFAS.



Fonte: Autor (2021), captura de tela do ANAFAS.

Figura 37 – “Evolução de Níveis de Curto-Circuito” no ANAFAS - Configuração.



Fonte: Autor (2021), captura de tela do ANAFAS.

Na Figura 37, dentro da opção “Evolução nos Níveis de Curto-Circuito” deve-se escolher em “configuração 1” o primeiro caso, sem o empreendimento, e em “configuração 2”

escolhe-se o segundo caso, com o empreendimento em questão modelado. Ao clicar em “executar”, o programa ANAFAS retorna os valores desejados de níveis de curto-circuito e evolução nos barramentos estudados. Repara-se que os valores de retorno podem ser filtrados de acordo com a evolução percentual nos barramentos, escolhendo um valor desejado na opção de “Informar barras com evolução acima de:...”.

A Tabela 2 mostra os valores dos níveis de curto-circuito calculados no caso antes da entrada do empreendimento a ser analisado. Foram calculados valores em apenas dez barramentos, que tiveram uma evolução acima de 2% e serão mais impactados com a entrada do empreendimento em questão.

Tabela 2 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN antes da entrada em operação da SE Tubarão Sul.

<b>Subestação</b>	<b>kV</b>	<b>DJ (kA)</b>	<b>3F (kA)</b>	<b>1F (kA)</b>	<b>2F (kA)</b>	<b>Icc/Icn(%)</b>
Tubarão	69,0	31,5	11,6	11,2	11,8	37,4
Jorge Lacerda A	69,0	20,0	15,0	18,8	18,2	93,8
Jorge Lacerda A	13,8	S.INF.	25,1	0,0	21,8	-
Jorge Lacerda A	138,0	14,4	12,5	14,3	13,8	99,0
Siderópolis	230,0	9,6	8,0	8,7	8,6	90,9
Tubarão	13,8	S.INF.	8,8	9,7	9,4	-
Tubarão	13,8	S.INF.	8,8	9,7	9,4	-
Jorge Lacerda B	230,0	31,5	12,6	15,7	15,1	49,8
Jorge Lacerda C	230,0	NE	12,4	15,3	14,7	-
Jorge Lacerda A	230,0	31,5	12,5	15,5	14,9	49,2

Fonte: Autor (2021).

Na tabela acima também são mostrados os valores dos disjuntores de menor capacidade de interrupção simétrica dos barramentos monitorados pelo ONS, que são disponibilizados pelo ONS, os níveis de curto-circuito calculados em cada barramento analisado e o valor percentual “Icc/Icn” na última coluna, que representa a comparação do nível de curto-circuito no barramento com seu respectivo disjuntor de menor capacidade de interrupção simétrica. O cálculo de “Icc/Icn” é feito através da divisão do maior nível de

curto-circuito calculado no barramento, seja uma falta monofásica, bifásica ou trifásica, pelo valor da capacidade de interrupção de corrente de curto simétrica do disjuntor de menor capacidade do barramento em questão. Percebe-se que existem dois barramentos que estão com quase 100% de valor percentual “ $I_{cc}/I_{cn}$ ”, que são os barramentos 138 kV e 69 kV da subestação Jorge Lacerda A.

A Tabela 3 mostra os valores dos níveis de curto-circuito calculados no caso após a entrada em operação da subestação Tubarão Sul. Foram calculados os valores para os mesmos dez barramentos estudados no caso anterior à entrada do empreendimento em questão.

Tabela 3 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN após a entrada em operação da SE Tubarão Sul.

<b>Subestação</b>	<b>kV</b>	<b>DJ (kA)</b>	<b>3F (kA)</b>	<b>1F (kA)</b>	<b>2F (kA)</b>	<b>I<sub>cc</sub>/I<sub>cn</sub>(%)</b>
Tubarão	69,0	31,5	14,1	13,8	14,4	45,7
Jorge Lacerda A	69,0	20,0	16,9	20,8	20,1	104,2
Jorge Lacerda A	13,8	S.INF.	26,2	0,0	22,7	-
Jorge Lacerda A	138,0	14,4	13,0	14,8	14,3	102,6
Siderópolis	230,0	9,6	8,1	9,0	8,8	93,5
Tubarão	13,8	S.INF.	9,1	9,9	9,6	-
Tubarão	13,8	S.INF.	9,1	9,9	9,6	-
Jorge Lacerda B	230,0	31,5	12,8	16,0	15,5	50,9
Jorge Lacerda C	230,0	NE	12,6	15,6	15,0	-
Jorge Lacerda A	230,0	31,5	12,7	15,8	15,2	50,2

Fonte: Autor (2021).

Então, as variações dos níveis de curto-circuito em cada um desses barramentos também são calculadas, e o cálculo é feito da seguinte maneira: no barramento analisado, subtrai-se o valor do nível de curto-circuito após a entrada do empreendimento pelo valor do nível de curto-circuito antes da entrada do empreendimento em questão, e divide-se o valor encontrado nessa subtração pelo nível de curto circuito antes da entrada do empreendimento em questão, e assim, tem-se o valor calculado da evolução em cada barramento para cada tipo de falta. Esses valores estão descritos na Tabela 4, onde na segunda coluna são apresentados



os valores referentes à evolução do nível de curto-circuito trifásico, na terceira coluna são apresentados os valores referentes à evolução dos níveis de curto-circuito monofásico e na quarta coluna são apresentados os valores referentes à evolução dos níveis de curto-circuito bifásico.

Tabela 4 – Variação nos níveis de curto-circuito.

<b>Subestação</b>	<b>kV</b>	<b>Evolução 3F (%)</b>	<b>Evolução 1F (%)</b>	<b>Evolução 2F (%)</b>	<b>Maior Evolução (%)</b>
Tubarão	69,0	22,0	23,1	22,3	23,1
Jorge Lacerda A	69,0	12,3	11,1	10,5	12,3
Jorge Lacerda A	13,8	4,3	-	4,3	4,3
Jorge Lacerda A	138,0	3,6	3,6	3,5	3,6
Siderópolis	230,0	1,1	2,9	2,2	2,9
Tubarão	13,8	2,6	1,8	2,0	2,6
Tubarão	13,8	2,6	1,8	2,0	2,6
Jorge Lacerda B	230,0	1,7	2,2	2,4	2,4
Jorge Lacerda C	230,0	1,7	2,1	2,1	2,1
Jorge Lacerda A	230,0	1,6	2,0	2,1	2,1

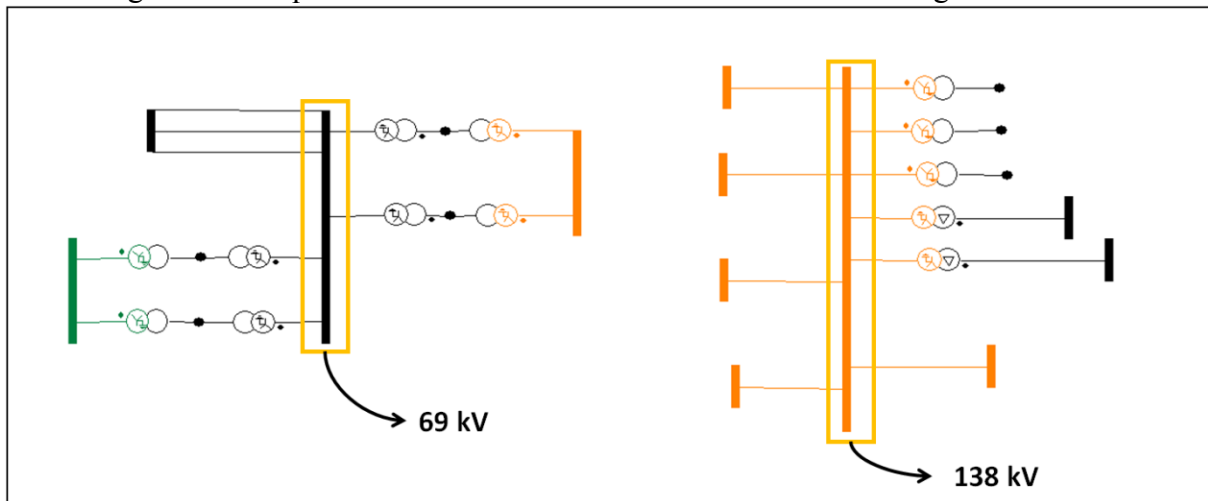
Fonte: Autor (2021).

Analisando a Tabela 2, a Tabela 3 e a Tabela 4, conclui-se que a implantação da nova subestação Tubarão Sul na região Sul de Santa Catarina provoca alterações superiores a 2% nos níveis de curto-circuito simétricos nas subestações do SIN. Verifica-se ainda que ocorreram variações acima de 10% nos barramentos de 69 kV das subestações Tubarão e Jorge Lacerda A, logo, de acordo com a referência “Procedimento de Rede - Módulo 7 - Submódulo 7.4 - Estudos pré operacionais de integração de instalações da Rede de Operação” (ONS, 2021), o ONS deveria alertar os agentes de operação envolvidos para que, caso necessário, promovam ajustes nos relés de proteção.

Da Tabela 3 observa-se que os barramentos 138 kV e 69 kV da subestação Jorge Lacerda A apresentaram valores acima de 100% da relação de corrente de curto-circuito pela capacidade de interrupção simétrica do disjuntor de menor capacidade, o que é um indicativo

de que podem existir disjuntores superados conectados a esses barramentos. Logo, realiza-se um estudo de curto-circuito de corrente passante nesses dois barramentos, comparando as capacidades de interrupção simétrica de cada disjuntor com as correntes de curto-circuito passantes por eles, para verificar se houve superação adicional de disjuntores devido à entrada em operação do empreendimento em análise. Tal estudo foi detalhado no capítulo 3 deste trabalho, e no presente capítulo foi utilizado o programa ANAFAS para confecção dos estudos de corrente passante. A Figura 38 mostra um esquemático dos barramentos de 69 kV e 138 kV da subestação Jorge Lacerda A, cada barramento com seus respectivos circuitos conectados.

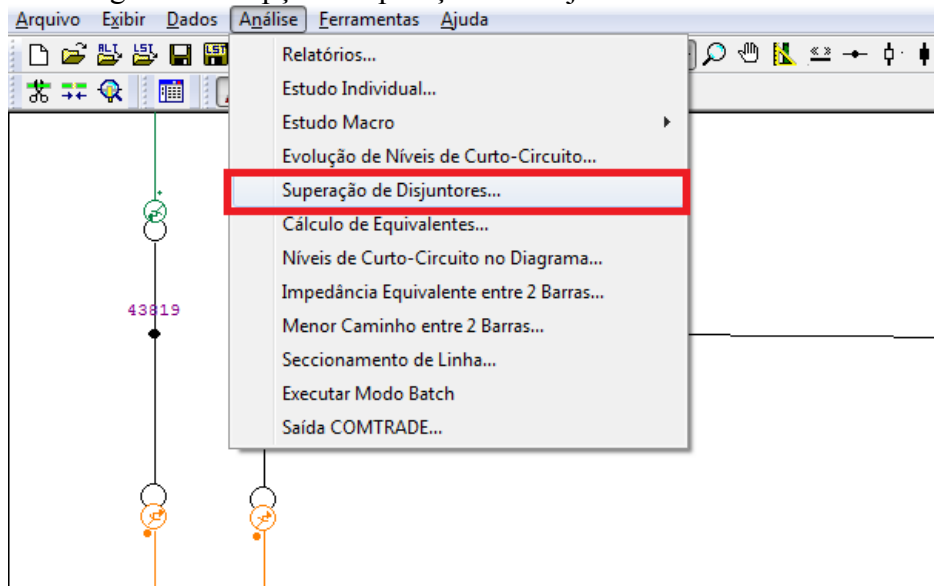
Figura 38 - Esquemático dos barramentos 69 kV e 138 kV de Jorge Lacerda A.



Fonte: Autor (2021), captura de tela do ANAFAS.

No programa ANAFAS (CEPEL), o estudo de corrente passante pode ser feito escolhendo na barra de ferramentas a opção “Análise” e então, dentro de “Análise”, escolhe-se a opção “Superação de Disjuntores”, como é mostrado na Figura 39.

Figura 39 – Opção “Superação de Disjuntores” no ANAFAS.



Fonte: Autor (2021), captura de tela do ANAFAS.

Após isso, já dentro da opção “Superação de Disjuntores”, clica-se na opção “Selecionar” em barras analisadas, e dessa forma, seleciona-se o barramento em questão, no qual se deseja fazer o estudo de corrente passante. Clica-se em executar e o ANAFAS retorna uma tabela com os valores das correntes passantes em cada disjuntor do barramento estudado.

Todas as situações necessárias para estudo de corrente passante, vistas no capítulo 3 deste trabalho, foram analisadas e os resultados do estudo de corrente passante para os barramentos 69 kV e 138 kV da SE Jorge Lacerda A se encontram sumarizados no Quadro 1 e no Quadro 2, respectivamente. Os valores e numeração de cada disjuntor presentes nos quadros abaixo foram retirados dos relatórios de Estudos de Curto-Circuito (2019) (2020), elaborados pelo ONS e disponibilizados no portal SINtegre.

Quadro 1 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 69 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul.

Equipamento destino		Capacidade de interrupção simétrica (ICCS) (kA)	Corrente de curto-circuito pelo disjuntor (ICC)			Relação corrente de curto/capacidade de interrupção (ICC/ICCS)			Situação
Nome	Nº DJ		Monofásico (kA)	Trifásico (kA)	Bifásico-terra (kA)	Monofásico (%)	Trifásico (%)	Bifásico-terra (%)	
LT Tubarão C1	452	31,50	20,74	16,80	20,05	65,84	53,33	63,65	OK
LT Tubarão C2	442	31,50	20,78	16,83	20,08	65,97	53,43	63,75	OK

LT Tubarão C3	402	31,50	20,71	16,79	20,01	65,75	53,30	63,52	OK
TF 10 230/69/13,8 kV	462	20,00	15,69	13,19	15,13	78,45	65,95	75,65	OK
TF 11 230/69/13,8 kV	412	31,50	17,00	13,72	16,45	53,97	43,56	52,22	OK
TF 8 138/69/13,8 kV	422	24,00	19,32	15,81	18,65	80,50	65,88	77,71	OK
TF 9 138/69/13,8 kV	432	24,00	14,59	14,59	16,93	60,79	60,79	70,54	OK

Fonte: Autor (2021).

Quadro 2 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 138 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul.

Equipamento destino		Capacidade de interrupção simétrica (ICCS) (kA)	Corrente de curto-circuito pelo disjuntor (ICC)			Relação corrente de curto/capacidade de interrupção (ICC/ICCS)			Situação
Nome	Nº DJ		Monofásico (kA)	Trifásico (kA)	Bifásico-terra (kA)	Monofásico (%)	Trifásico (%)	Bifásico-terra (%)	
LT Palhoça	512	14,40	13,97	12,08	13,50	97,01	83,89	93,75	Alerta
LT Bom Jardim da Serra	542	14,40	13,78	12,02	13,33	95,69	83,47	92,57	Alerta
LT Imbituba	522	14,40	14,04	12,21	13,58	97,50	84,79	94,31	Alerta
LT Tubarão Sul	562	14,40	13,83	12,11	13,41	96,04	84,10	93,13	Alerta
TR-7 230/138 kV	612	19,90	13,02	11,59	12,69	65,43	58,24	63,77	OK
TR-5 230/138 kV	592	14,40	13,02	11,59	12,70	90,42	80,49	88,19	Alerta
TR-8 138/69 kV + TR-9 138/69 kV	622	50,00	14,62	12,97	14,19	29,24	25,94	28,38	OK
LT UTE Jorge Lacerda A C3	582	31,50	14,62	12,97	14,19	46,41	41,17	45,05	OK
LT UTE Jorge Lacerda A C1 - UG01	532	14,40	13,67	11,71	13,26	94,93	81,32	92,08	Alerta

LT UTE Jorge Lacerda A C2 - UG02	572	14,40	13,67	11,71	13,26	94,93	81,32	92,08	Alerta
Amarre	552	31,50	14,77	12,97	14,32	46,89	41,17	45,46	OK

Fonte: Autor (2021).

Após a análise de corrente passante, verifica-se que nenhum disjuntor informado apresentou uma relação entre a corrente passante e sua capacidade de interrupção simétrica maior ou igual a 100%, logo nenhum disjuntor apresentou violação da capacidade de interrupção simétrica. Por outro lado, no barramento 138 kV da SE Jorge Lacerda A, a mesma relação entre a corrente passante e sua capacidade de interrupção simétrica de 7 disjuntores atingiram valores maiores que 90% e menores que 100%, logo esses disjuntores são considerados em situação de “Alerta”.

## 5.5 SENSIBILIDADE À ENTRADA DE OUTROS EMPREENDIMENTOS

Como foi dito no capítulo 4 deste trabalho, muitas vezes, para fins de modelagem de casos mais próximos da realidade, são considerados outros empreendimentos entrando em operação em conjunto com o empreendimento que é objeto de estudo. Os resultados das simulações podem então mudar drasticamente.

Para fins de demonstração foi escolhido, dentro da base de dados disponibilizada pelo ONS, nos arquivos de alteração dos casos de curto-circuito disponibilizados no portal SINtegre, um empreendimento próximo do empreendimento objeto de estudo (SE Tubarão Sul) que foi a implantação da subestação 525/230 kV Siderópolis 2, que tem a data de entrada próxima da data da SE Tubarão Sul. O código feito no editor de texto EditCepel (CEPEL) para implantação da SE Siderópolis 2 se encontra no Apêndice B deste trabalho.

Utilizando o mesmo procedimento que foi mostrado anteriormente neste capítulo, são feitas as alterações desejadas no caso em estudo e então são calculados os níveis de curto-circuito nos barramentos de interesse. Desta vez, calculou-se os níveis de curto-circuito somente nos barramentos 138 kV e 69 kV da SE Jorge Lacerda A, pois esses foram os barramentos com a verificação de maior risco de superação de disjuntores. A Tabela 5 mostra os resultados desses cálculos.

Tabela 5 – Níveis de Curto-Circuito nos barramentos do SIN após a entrada em operação da SE Tubarão Sul em conjunto com parte da SE Siderópolis 2.

Subestação	kV	DJ (kA)	3F (kA)	1F (kA)	2F (kA)	Icc/Icn(%)
Jorge Lacerda A	69,0	20,0	18,7	22,7	21,8	113,7
Jorge Lacerda A	138,0	14,4	14,1	15,7	15,3	109,2

Fonte: Autor (2021).

Da tabela acima, tem-se que os valores percentuais “Icc/Icn” de ambos barramentos ainda atinge valores maiores que 100%, logo o estudo de corrente passante deve ser feito, para resultados mais detalhados a fim de verificar se existem ou não disjuntores superados.

Utilizando mais uma vez o programa ANAFAS (CEPEL) para elaboração dos cálculos das correntes passantes pelos disjuntores de cada um dos barramentos analisados (138 kV e 69 kV da SE Jorge Lacerda A), os valores das correntes e situação dos disjuntores são mostrados nos quadros a seguir.

Quadro 3 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 69 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul + SE Siderópolis 2.

Equipamento destino		Capacidade de interrupção simétrica (ICCS) (kA)	Corrente de curto-circuito pelo disjuntor (ICC)			Relação corrente de curto/capacidade de interrupção (ICC/ICCS)			Situação
Nome	Nº DJ		Monofásico (kA)	Trifásico (kA)	Bifásico-terra (kA)	Monofásico (%)	Trifásico (%)	Bifásico-terra (%)	
LT Tubarão C1	452	31,50	22,62	18,58	21,71	71,81	58,98	68,92	OK
LT Tubarão C2	442	31,50	22,66	18,62	21,75	71,94	59,11	69,05	OK
LT Tubarão C3	402	31,50	22,58	18,56	22,66	71,68	58,92	71,94	OK
TF 10 230/69/13,8 kV	462	20,00	16,66	14,22	16,06	83,30	71,10	80,30	OK
TF 11 230/69/13,8 kV	412	31,50	14,85	15,85	17,51	47,14	50,32	55,59	OK
TF 8 138/69/13,8 kV	422	24,00	21,05	17,48	20,21	87,71	72,83	84,21	OK
TF 9 138/69/13,8 kV	432	24,00	19,12	16,12	18,33	79,67	67,17	76,38	OK

Fonte: Autor (2021).

Quadro 4 – Estudo de curto-circuito de corrente passante – barra Jorge Lacerda A 138 kV após a entrada em operação da SE Tubarão Sul + SE Siderópolis 2.

Equipamento destino		Capacidade de interrupção simétrica (ICCS) (kA)	Corrente de curto-circuito pelo disjuntor (ICC)			Relação corrente de curto/capacidade de interrupção (ICC/ICCS)			Situação
Nome	Nº DJ		Monofásico (kA)	Trifásico (kA)	Bifásico-terra (kA)	Monofásico (%)	Trifásico (%)	Bifásico-terra (%)	
LT Palhoça	512	14,40	14,97	13,22	14,50	103,96	91,81	100,69	Superado
LT Bom Jardim da Serra	542	14,40	14,72	13,11	14,29	102,22	91,04	99,24	Superado
LT Imbituba	522	14,40	15,02	13,36	14,58	104,31	92,78	101,25	Superado
LT Tubarão Sul	562	14,40	14,57	12,97	14,16	101,18	90,07	98,33	Superado
TR-7 230/138 kV	612	19,90	13,62	12,33	13,32	68,44	61,96	66,93	OK
TR-5 230/138 kV	592	14,40	13,63	12,33	13,33	94,65	85,63	92,57	Alerta
TR-8 138/69 kV + TR-9 138/69 kV	622	50,00	15,56	14,11	15,18	31,12	28,22	30,36	OK
LT UTE Jorge Lacerda A C3	582	31,50	15,56	14,11	15,18	49,40	44,79	48,19	OK
LT UTE Jorge Lacerda A C1 - UG01	532	14,40	14,68	12,85	14,27	101,94	89,24	99,10	Superado
LT UTE Jorge Lacerda A C2 - UG02	572	14,40	14,68	12,85	14,27	101,94	89,24	99,10	Superado
Amarre	552	31,50	15,73	14,11	15,31	49,94	44,79	48,60	OK

Fonte: Autor (2021).

Dos quadros acima, são observados valores abaixo de 100% na relação entre a corrente passante no disjuntor e sua capacidade de interrupção simétrica no barramento de 69 kV da SE Jorge Lacerda A, logo, mesmo com a entrada em operação da subestação

Siderópolis 2 em conjunto com a subestação Tubarão Sul não é verificada a superação de nenhum disjuntor. Já no barramento 138 kV da SE Jorge Lacerda A são verificados valores acima de 100% na relação entre a corrente passante no disjuntor e sua capacidade de interrupção simétrica em seis disjuntores, dessa forma esses disjuntores são considerados superados por corrente de curto-circuito simétrica.

## 5.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES SOBRE O ESTUDO DE CASO

Considerando os estudos feitos neste capítulo, a entrada em operação da nova subestação Tubarão Sul no sul de Santa Catarina, empreendimento de responsabilidade da EDP Transmissão Litoral Sul S.A., vencedora do leilão nº 013/2015 1ª Etapa – Lote Q da ANEEL o qual foi indicado pela EPE no documento “Estudos para a licitação da expansão da transmissão - Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1” (EPE, 2013), deve causar impactos significativos nos níveis de curto-circuito.

No primeiro momento, onde só foi adicionada a subestação Tubarão Sul, com mais alguns ajustes no caso base escolhido, verificou-se uma variação acima de 2% nos níveis de curto-circuito de dez barramentos, sendo que em dois deles, os barramentos de 69 kV de Jorge Lacerda A e Tubarão, verificou-se uma variação acima de 10%. Para essas evoluções maiores do que 10% cabe ao ONS alertar os agentes de operação envolvidos para que, caso necessário, promovam ajustes nos relés de proteção. Verifica-se também valores acima de 100% da relação de corrente de curto-circuito pela capacidade de interrupção simétrica do disjuntor de menor capacidade nos barramentos 138 kV e 69 kV da subestação Jorge Lacerda A, o que seria um indicativo de que podem existir disjuntores superados nesses barramentos. Foram elaborados estudos de correntes passantes para esses dois barramentos. Após a análise de corrente passante, verifica-se que nenhum disjuntor em nenhum dos dois barramentos estudados apresentou violação da capacidade de interrupção simétrica, logo esses não são considerados superados.

Em um segundo momento, considerou-se a entrada de uma segunda subestação, a SE Siderópolis 2, em conjunto com a entrada em operação da subestação que é objeto de estudo, SE Tubarão Sul. Isso foi feito pois a entrada de empreendimentos próximos ao empreendimento em questão pode alterar drasticamente o resultado das simulações. Nesse caso, verificou-se que a relação de corrente de curto-circuito pela capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores de menor capacidade nos barramentos 138 kV e 69 kV da SE Jorge



Lacerda A continua atingindo valores maiores que 100%, porém ainda maiores do que na primeira simulação feita, sem a consideração da SE Siderópolis 2. Foram elaborados estudos de correntes passantes para esses dois barramentos novamente. Após a análise de corrente passante, verifica-se valores acima de 100%, da relação entre a corrente passante pelo disjuntor e a sua capacidade de interrupção simétrica, em seis disjuntores. Logo, esses disjuntores apresentam violação da capacidade de interrupção simétrica e são considerados superados.

Da comparação entre o estudo feito inicialmente, somente com a entrada da SE Tubarão Sul, e o estudo feito posteriormente, com a entrada conjunta da SE Tubarão Sul com a SE Siderópolis, conclui-se que a entrada conjunta das duas subestações faz com que os níveis de curto-circuito dos barramentos analisados cresçam ainda mais do que na análise feita somente com a subestação que é objeto de estudo. Esse crescimento adicional nos níveis de curto-circuito, causado pela SE Siderópolis 2, fez com que seis dos sete disjuntores que estavam em situação de “Alerta” no caso considerando somente a SE Tubarão Sul mudassem sua situação para “Superados”. Entende-se então que é importante a análise de casos que considerem a entrada em operação de outros empreendimentos em conjunto com o empreendimento que é objeto de estudo caso suas datas de entrada prevista forem próximas umas das outras, onde uma análise mais completa de um sistema mais crítico pode trazer resultados importantes e definitivos na análise dos impactos causados nos níveis de curto-circuito.

## 6 CONCLUSÃO

O crescimento do sistema elétrico brasileiro pode gerar relevantes impactos nas correntes de curto-circuito que fluem nos elementos do sistema na ocorrência de uma falta, podendo acarretar mudanças nos ajustes de proteção ou até mesmo superação indesejada de disjuntores.

Nesse trabalho foram estudados os métodos utilizados em estudos de curto-circuito que avaliam o impacto, sob o ponto de vista das correntes de curto-circuito e superação de disjuntores, da entrada de novos empreendimentos de transmissão no Sistema Interligado Nacional (SIN). Primeiramente foram apresentadas, no capítulo 3, as metodologias presentes no documento “Nota Técnica n.º 048/2014 - Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão, 2014” (2014), onde se estabelece as diretrizes para análise de superação de disjuntores, e foi dado um foco maior na metodologia que analisa a superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica. Após isso, apresentou-se a metodologia e os critérios utilizados pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), documentados nos Procedimentos de Rede propostos também pelo ONS, para análise de evolução nos níveis de curto-circuito decorrente da entrada de um empreendimento de transmissão no SIN. Um estudo de caso foi utilizado para demonstrar como essas metodologias, tanto de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica quanto da análise de evolução dos níveis de curto-circuito do sistema, são empregadas na prática.

No estudo de caso, verificou-se que a entrada de uma subestação de transmissão teve impactos relevantes nos níveis de curto-circuito dos barramentos do sistema elétrico brasileiro. Evoluções significativas nos níveis de curto-circuito das barras, com valores acima de 10%, foram verificadas, caso no qual cabe ao ONS alertar os agentes de operação envolvidos para que, caso necessário, promovam ajustes nos relés de proteção. Verificou-se também variações que acarretaram níveis de curto-circuito acima de 100% da relação entre a corrente de curto-circuito e a capacidade de interrupção simétrica do disjuntor de menor capacidade em dois barramentos, onde foram feitos estudos mais detalhados (estudos de corrente passante) para analisar se existe superação de disjuntores nesses barramentos. Após a análise de corrente passante, verificou-se que nenhum disjuntor apresentou violação da sua capacidade de interrupção simétrica, sendo assim, nenhum disjuntor foi superado por corrente de curto-circuito simétrica.

Em um segundo momento do estudo de caso, foi analisada a entrada em operação da mesma subestação do estudo anterior, porém em conjunto com a entrada em operação de outra subestação vizinha, ambas com data de implantação próximas. Nesse caso, verificou-se que as evoluções nos níveis de curto-circuito do SIN foram ainda mais significativas. Os barramentos mais críticos, que já apresentavam níveis de curto-circuito acima do valor da capacidade de interrupção simétrica do menor disjuntor conectado a eles somente com a entrada da primeira subestação, apresentaram níveis de curto-circuito ainda maiores com a entrada conjunta das duas subestações analisadas, onde foram feitos novamente estudos de corrente passante para o novo caso. Do estudo de corrente passante verificou-se valores acima de 100% da relação entre a corrente passante pelo disjuntor e a sua capacidade de interrupção simétrica em seis disjuntores de um dos barramentos analisados, logo esses disjuntores foram considerados superados por corrente de curto-circuito simétrica.

Da comparação do estudo feito inicialmente, considerando somente a entrada de uma subestação, e o estudo feito posteriormente, considerando a entrada conjunta de duas subestações, verificou-se que a entrada conjunta dos dois empreendimentos elevou ainda mais as correntes de curto-circuito do SIN, onde essa elevação adicional causou a superação de seis disjuntores em um dos barramentos mais afetados pela entrada dos empreendimentos em questão. Conclui-se então a importância de analisar casos completos de estudo, que consideram um cenário mais próximo da realidade operacional do sistema elétrico brasileiro, no qual esse estudo mais completo pode trazer resultados importantes que o estudo mais simplificado não teve a capacidade de contemplar.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a confecção de estudos de curto-circuito com uma visão mais vinculada ao planejamento do sistema elétrico brasileiro, tendo que o presente trabalho apresentou uma visão com viés principal de operação e impactos de curto prazo.

## REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução ANEEL nº 245**. [S.l.]. 1998.

CARVALHO et al. **Disjuntores e chaves: Aplicação em sistemas de potência**. CIGRE. Niterói. 1995.

CARVALHO, A. C. et al. **Superação de equipamentos de alta tensão: critérios de análise e processo de indicações de substituições na rede básica e demais instalações da transmissão**. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro. 2007.

CEPEL. **ANAFAS - Análise de Falhas Simultâneas**. Disponível em: <[http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/anafas-analise-de-faltas-simultaneas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/anafas-analise-de-faltas-simultaneas.htm)>.

CEPEL. EditCepel - Editor de textos para aplicativos de análise de redes elétricas. Disponível em: <[http://www.cepel.br/pt\\_br/produtos/editcepel-editor-de-textos-para-aplicativos-de-analise-de-redes-eletricas.htm](http://www.cepel.br/pt_br/produtos/editcepel-editor-de-textos-para-aplicativos-de-analise-de-redes-eletricas.htm)>.

DUARTE, I. S. **Alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito usando representação no nível de subestação**. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão - Análise técnico-econômica de alternativas: Relatório R1**. Rio de Janeiro. 2013. (Nº EPE-DEE-DEA-RE-009/2013-rev1).

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Diretrizes para a elaboração dos relatórios técnicos para a licitação de novas obras da rede básica**. [S.l.]. 2018. (EPE-DEE-DEA-RE-001/2018-rev0).

FRONTIN, S. D. O. **Equipamentos de Alta Tensão - Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. 1ª. ed. Brasília: Goya Editora LTDA., 2013.

G1. **g1.globo.com**, 2016. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/negocios/noticia/2016/04/leilao-de-65-mil-km-de-linhas-de-transmissao-atrai-interessados.html>>. Acesso em: Março 2021.

GASPAR, A. R. **Diretrizes para análise de superação de disjuntores de alta tensão: um estudo de caso para a área Rio de Janeiro no horizonte 2005-2008**. Universidade Federal Fluminense. Niterói. 2006.

GODOY, M. V. D.; ALVES, F. R. **Crítérios de Análise de superação de disjuntores de alta tensão quanto a corrente de carga, curto circuito e tensão de restabelecimento transitória adotados pelo planejamento CHESF a partir das novas revisões e normas IEC e ANSI**. XIX SNPTEE. Rio de Janeiro. 2007.

GRAINGER, J. J.; STEVENSON, W. D. **Power System Analysis**. [S.l.]: [s.n.], 1994.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2ª. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **RE2.1/090-2003 - Critérios para a especificação de disjuntores de alta tensão quando submetido a correntes de curto-circuito com constante de tempo elevada**. [S.l.]. 2003.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 4 - Submódulo 4.3 - Metodologia para elaboração das propostas de ampliações e reforços**. [S.l.]. 2010.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Nota Técnica n.º 048/2014 - Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão**. [S.l.]. 2014.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 11 - Submódulo 11.3 - Estudos de curto-circuito**. [S.l.]. 2017.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Estudos de curto-circuito período 2019-2024 - Volume 1.** [S.l.]. 2019. (DPL-REL-0374/2019).

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Análise estatística das perturbações ocorridas na rede básica referente ao ano de 2019.** [S.l.]. 2020. (DPL-REL-0117/2020).

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Estuods de curto-circuito período 2020-2025 - Volume 1.** [S.l.]. 2020. (DEP-REL-0358/2020).

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 2 - Submódulo 2.10 -Rrequisitos técnicos mínimos para a conexão às instalações de transmissão.** [S.l.]. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 3 - Submódulo 3.1 - Planejamento da operação elétrica de médio prazo.** [S.l.]. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 3 - Submódulo 3.12 - Estudos de curto-circuito.** [S.l.]. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 7 - Submódulo 7.1 - Acesso às instalações de transmissão.** [S.l.]. 2020.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimento de Rede - Módulo 7 - Submódulo 7.4 - Estudos pré operacionais de integração de instalações da Rede de Operação.** [S.l.]. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimentos de Rede - Módulo 2 - Submódulo 2.3 - Premissas, critérios e metodologia para estudos elétricos.** [S.l.]. 2021.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. Portal SINtegre. Disponível em: <<https://sintegre.ons.org.br/>>.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS. **Procedimento de Rede - Módulo 7 - Submódulo 7.4 - Estudos pré operacionais de integração de instalações da Rede de Operação.** [S.l.].

SAADAT, H. **Power System Analysis.** [S.l.]: McGraw-Hill, 1999.

SALGADO, R. S. **Introdução aos Sistemas de Energia Elétrica.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2016.

SINDER, D. **Métodos de cálculo da tensão de restabelecimento transitória para análise da superação de disjuntores de alta tensão.** UFRJ. Rio de Janeiro. 2007.

SINDER, R. L. **Metodologia de análise de superação de instalações de alta tensão com aplicação no Sistema Interligado Nacional.** UFRJ. Rio de Janeiro. 2016.

TRINDADE, P. G. **Medidas para redução de níveis de curto-circuito: Estudo de caso da área Rio.** UFRJ/ Escola Politécnica. Rio de Janeiro. 2019.

## APÊNDICE A – MATRIZES $Z_{barra}$ E $Y_{barra}$ PARA CÁLCULO COMPUTACIONAL DAS CORRENTES DE CURTO-CIRCUITO

Para análises de sistemas de grande porte, com um grande número de barramentos e equipamentos, o cálculo das correntes de curto-circuito não deve ser feito de forma manual devido à sua grande complexidade, sendo necessário o uso de ferramentas computacionais para tal atividade. Nos métodos computacionais, é comum o uso das matrizes de admitância e impedância para representar o sistema a ser analisado, e tais matrizes são chamadas de “ $Y_{barra}$ ” e “ $Z_{barra}$ ” respectivamente. O uso das matrizes citadas para representação do sistema elétrico pode ser descrito como uma análise nodal da modelagem barra-ramo da rede.

A matriz admitância ( $Y_{barra}$ ) é uma matriz que descreve totalmente a interconexão elétrica dos componentes da modelagem barra-ramo da rede elétrica (DUARTE, 2013). Ela é uma matriz quadrada, simétrica e esparsa, onde os elementos da diagonal principal ( $Y_{kk}$ ) são chamados de admitâncias próprias de cada barra e os demais termos ( $Y_{km}$ ) são as admitâncias mútuas. Os elementos da diagonal principal são obtidos através do somatório das admitâncias de todos os elementos conectados ao barramento em questão, inclusive cargas, no caso o barramento  $k$ , já os demais elementos são obtidos através da soma das admitâncias que conectam as barras em questão, no caso as barras  $k$  e  $m$ .

A matriz  $Z_{barra}$  é a matriz de impedância nodal, onde seus elementos da diagonal principal ( $Z_{kk}$ ) fornecem a impedância de Thévenin vista pela barra em questão ( $k$ ), e pode ser obtida através da inversão da matriz  $Y_{barra}$ , porém este processo pode ser computacionalmente custoso devido ao grande número de operações matemáticas que a inversão envolve.

Para fins de cálculo de curto-circuito utilizando a matriz  $Z_{barra}$ , só é necessário o conhecimento dos elementos referentes às colunas relativas às barras que estão envolvidas na falta. Para isso, obtém-se primeiro a matriz  $Y_{barra}$ , e através de sua fatoração se calculam os elementos de interesse da matriz  $Z_{barra}$ . As impedâncias de sequência positiva, negativa e zero vista pela barra  $k$ , que são representadas respectivamente por  $Z_{1kk}$ ,  $Z_{2kk}$  e  $Z_{0kk}$ , são calculadas a partir dos elementos da diagonal principal das matrizes  $Z_{barra}$  de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente.

A tensão em cada barra durante o curto-circuito pode ser calculada também a partir da matriz  $Z_{barra}$ , primeiramente com a obtenção de um vetor  $\Delta V$  que representa a variação de tensão em cada barra. Para cálculo da tensão pós falta em uma barra  $k$ , soma-se a variação de



tensão na barra  $k$  ( $\Delta V_k$ ) com a tensão pré-falta nesta mesma barra. Do conhecimento dessas tensões, é possível calcular as correntes que fluem entre barramentos, por exemplo a corrente  $I_{km}$  que flui entre as barras  $k$  e  $m$ .



```

LT 230 kV SIDERÓPOLIS 2 - SIDERÓPOLIS C1 E C2          =
 1056  1057  1L0.04550.39640.27001.1713NOVO          998      6
 1056  1057  2L0.04550.39640.27001.1713NOVO          998      6
(
(LT 525 kV CAMPOS NOVOS - ABDON BATISTA C2
 955   9738  2L0.02470.43680.52981.6557NOVO          998      39
(
(LT 525 kV ABDON BATISTA - SIDEROPOLIS 2 C1 E C2
 9738  1055  1L0.12882.21932.57429.0598NOVO          998      209
 9738  1055  2L0.12882.21932.57429.0598NOVO          998      209
99999
(////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////////
DSHL
(-----Dados de Shunt de Linha-----)
(BF  CE BT   NCTNG  Qpos  L  Rn   Xn  E Nome  NunNop          IA SA
(-----)
 9738  1055   1D10  -75.0          NOVO          998
 9738  1055   2D10  -75.0          NOVO          998
 9738  1055   1P10 -150.0          NOVO          998
 9738  1055   2P10 -150.0          NOVO          998
99999
(
FIM

```