UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA SETOR DE TECNOLOGIA

> ANA CAROLINA DE ANTONIO LEONARDO ALFINI BOLSI

CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM DOIS ESTÁGIOS PARA REDES MODELADAS NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O ANAFAS

> CURITIBA 2019

ANA CAROLINA DE ANTONIO LEONARDO ALFINI BOLSI

CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM DOIS ESTÁGIOS PARA REDES MODELADAS NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O ANAFAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof. Dra. Elizete Maria Lourenço Universidade Federal do Paraná

Coorientadora: M.Sc. Gracita Batista Rosas Companhia Paranaense de Energia

CURITIBA 2019

"Em algum lugar, alguma coisa incrível está esperando para ser descoberta."

Carl Sagan

RESUMO

ANTONIO E BOLSI. CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO EM DOIS ESTÁGIOS PARA REDES MODELADAS NO NÍVEL DE SUBESTAÇÃO UTILIZANDO O ANAFAS. 2019. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

As subestações elétricas representam importantes estruturas frente aos sistemas elétricos de potência, seja considerando suas funções operacionais, como também seu papel como agente de proteção e segurança ao sistema. Nesse sentido, a abordagem de subestações sob sua modelagem no nível de seção de barras apresenta-se como uma análise de fundamental importância, uma vez que a partir dessa, permite-se dimensionar corretamente seus dispositivos e equipamentos de manobra e proteção. Sob esse contexto, o presente trabalho traz uma metodologia de análise de subestações em sua modelagem no nível de seção de barras considerando o cálculo de curto-circuito. O método proposto pelos autores, tratado por método em dois estágios, permite o cálculo das correntes de curto-circuito sobre todos os ramos internos das subestações, partindo-se dos resultados preliminares calculados pelo ANAFAS sob a abordagem barra-ramo da rede. Além da apresentação formal do método, descrevendo os conceitos e operações envolvidos em sua formulação, este trabalho aborda também sua implementação em um algoritmo de programação. E desta forma, através do programa desenvolvido, permitiu-se a aplicação do método para realização de simulações diante de uma rede elétrica localizada no Rio Grande do Norte -Brasil, sendo representado por um equivalente de 67 barras. Num primeiro momento, foi atribuída uma configuração hipotética para uma de suas subestações, extraída do modelo de 14 barras da IEEE, a fim de validar o funcionamento do programa e, consequentemente, do método. Posteriormente, foi estudada outra subestação do sistema, considerando sua configuração factual, e assim avaliando os níveis de curto-circuito e a condição de superação de seus disjuntores, considerando dois cenários distintos: a rede em sua configuração atual (2019); e a rede sob a estimativa de expansão do sistema para um horizonte de quatro anos (2023), com a inserção de novas fontes de geração eólica no sistema, para assim avaliar seus impactos e demonstrar a relevância do método proposto ao aplicá-lo em estudos referentes ao planejamento da expansão do setor elétrico.

Palavras-chave: Curto-circuito. Modelagem no Nível de Subestação. Expansão do Sistema Elétrico. Superação de Disjuntores. Teoria de Grafos.

ABSTRACT

ANTONIO E BOLSI. SHORT CIRCUIT CALCULATION ON TWO STAGES FOR GRIDS MODELED IN SUBSTATION LEVEL USING ANAFAS. 2019. 127 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

The electrical substations represent important structures in relation to electrical power systems, considering their operational functions, as well their role as a system protection and safety agent. In this sense, the approach of substation under their bus section level modeling is presented as an analysis of fundamental importance, once from this, it is possible to do correctly the dimension of their switching and protection devices and equipment. In this context, the present work presents a substation analysis methodology for the bus section level modeling, considering the short circuit calculation. The method proposed by the authors, treated by two stages method, allows the calculation of short-circuit currents for all internal branches of the substations, starting from the preliminary results calculated by the ANAFAS, under the bus-branch model. Besides the formal presentation of the method, describing the concepts and operations involved in its formulation, this work also discusses its implementation in a programming algorithm. On this way, through the developed program, it was allowed the application of the method to perform simulations for an electrical grid located in Rio Grande do Norte – Brazil, being represented by an equivalent of 67 buses. Initially, a hypothetical configuration was assigned to one of its substations, extracted from the IEEE 14-bus model, in order to validate the program, and consequently, the two stages method. Subsequently, another substation of the system, considering its real configuration, and thus evaluating the short circuit levels and the condition of its breakers, considering two situations: the grid on its current configuration (2019); and the grid by the estimated its system expansion over a four years horizon (2023). with the insertion of new sources by wind generation in the system, in order to evaluate its impacts and demonstrate the relevance of proposed method when applying it to studies involving the expansion of the electricity sector.

Keywords: Short Circuit. Substation Level Modeling. Electrical System Expansion. Breakers Overrun. Theory of Graphs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Mapa do Sistema de Transmissão - Setembro/2019	5
Figura 2.2 – Evolução da capacidade instalada total por fonte	7
Figura 2.3 – Evolução da capacidade da Fonte Eólica (MW).	8
Figura 2.4 – Modelos dos principais elementos do SEP para a sequência positiva.	
I) Gerador síncrono; II) Transformador; III) Linha de transmissão	13
Figura 2.5 – Modelos dos principais elementos do SEP para a sequência negativa.	
I) Gerador síncrono; II) Transformador; III) Linha de transmissão	14
Figura 2.6 – Modelos dos geradores síncronos e LTs para a sequência zero.	
I) Gerador síncrono em estrela aterrada; II) Gerador síncrono em estrela	
aterrada através de uma impedância $\dot{Z}_N;$ III) Linha de transmissão	15
Figura 2.7 – Esquema de conexão dos transformadores de núcleo envolvente de dois	
enrolamentos, para a sequência zero.	16
Figura 2.8 – Esquema de conexão dos transformadores de núcleo envolvido de dois	
enrolamentos, para a sequência zero.	16
Figura 2.9 – Circuitos equivalentes Thévenin na barra "k" da rede elétrica, para as	
três sequências.	17
Figura 2.10–Circuito equivalente para uma falta trifásica na barra "k".	18
Figura 2.11–Circuito equivalente para uma falta fase-terra na barra "k"	19
Figura 2.12–Circuito equivalente para uma falta fase-fase na barra "k"	20
Figura 2.13–Circuito equivalente para uma falta fase-fase-terra na barra "k". \ldots	22
Figura 2.14–Tipos de grafos	25
Figura 2.15–Matriz de incidência.	26
Figura 2.16–Sistema simplificado de geração, transmissão e distribuição de energia	
elétrica.	31
Figura 2.17–Arranjo barra simples	32
Figura 2.18–Arranjo barra simples seccionada	33
Figura 2.19–Arranjo barra principal e transferência	34
Figura 2.20–Arranjo barra dupla com disjuntor simples	35
Figura 2.21–Arranjo barra dupla com <i>By-pass</i>	36
Figura 2.22–Arranjo barra dupla com <i>By-pass</i>	36
Figura 2.23–Arranjo barra dupla com disjuntor duplo.	37
Figura 2.24–Arranjo barra dupla com disjuntor e meio	38
Figura 2.25–Esquema de anel simples.	39
Figura 2.26–Esquema de anéis múltiplos	40
Figura 2.27–Corrente de curto-circuito	44
Figura 2.28–Corrente de curto-circuito na barra.	45

1 6
46
18
53
57
52
33
34
70
74
76
78
79
30
33
34
) 3
) 3
94
96
) 8
)0
01
)2
11

Figura 6.18-	-Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação	
	de disjuntores, sob condição de falta bifásica-terra	111
Figura 6.19-	-Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação	
	de disjuntores, sob condição de falta trifásica.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Ocorrências dos curtos-circuitos.	43
Tabela 2.2 – Critérios de simetria e assimetria para a análise da superação por	
corrente de curto-circuito.	49
Tabela 3.1 – Relação X/R e nível de superação entre 1F, 3F e 2FT	55
Tabela 6.1 – Correntes de curto-circuito (em ampères) sobre cada disjuntor da su-	
bestação de Cutia - 34.5 kV, calculadas aplicando-se o método em dois	
estágios.	73
Tabela $6.2-{\rm Correntes}$ sobre os disjuntores da SE de João Câmara II - 230 kV,	
calculadas aplicando-se o método em dois estágios, para uma falta	
monofásica no nó de nº 1 da SE. Correntes em ampères. \ldots	77
Tabela 6.3 – Análise de superação de disjuntores do ANAFAS para a barra 8477,	
para uma capacidade de interrupção simétrica de 20 kA	86
Tabela 6.4 – Análise de superação de disjuntores do ANAFAS para a barra 8477,	
para uma capacidade de interrupção simétrica de 31.5 kA	86
Tabela 6.5 – Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó nº 1 da SE	
8477 no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em ampères.	87
Tabela 6.6 – Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó nº 12 da SE	
8477 no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em ampères.	87
Tabela $6.7-{\rm Correntes}$ de curto-circuito para uma falta monofásica nas LTs da SE,	
em módulo e em ampères	88
Tabela $6.8-{\rm Correntes}$ de curto-circuito para uma falta bifásica-terra nas LTs da SE,	
em módulo e em ampères	88
Tabela 6.9 – Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica nas LTs da SE, em	
módulo e em ampères	89
Tabela 6.10–Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica de <i>line out</i> da	
SE, em módulo e em ampères	90
Tabela 6.11–Correntes de curto-circuito para uma falta bifásica-terra de <i>line out</i> da	
SE, em módulo e em ampères	90
Tabela 6.12–Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica de <i>line out</i> da SE,	
em módulo e em ampères	91
Tabela 6.13–Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método	
de dois estágios, para uma ICCS de 20 kA	92
Tabela 6.14–Comparação da superação de disjuntores para as duas abordagens de	
análise	95

Tabela 6.15-	-Correntes sobre os disjuntores da SE de João Câmara II - 230 kV,	
	calculadas aplicando-se o método em dois estágios, para uma falta	
	monofásica no nó de nº 1 da SE. Correntes em ampères	99
Tabela 6.16-	-Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de	
	interrupção simétrica de 20 kA.	104
Tabela 6.17-	-Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de	
	interrupção simétrica de 25 kA.	104
Tabela 6.18-	-Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de	
	interrupção simétrica de 31.5 kA.	104
Tabela 6.19-	-Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de	
	interrupção simétrica de 40 kA.	105
Tabela 6.20-	-Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó nº 1 da SE	
	8477 expandida no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em	
	ampères	106
Tabela 6.21-	-Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó nº 13 da SE	
	8477 expandida no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em	
	ampères	106
Tabela 6.22-	-Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica nas LTs da SE,	
	em módulo e em ampères	107
Tabela 6.23-	-Correntes de curto-circuito para uma falta bifásica-terra nas LTs da SE,	
	em módulo e em ampères	107
Tabela 6.24-	-Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica nas LTs da SE, em	
	módulo e em ampères.	108
Tabela 6.25-	-Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica de <i>line out</i> da	
	SE, em módulo e em ampères	108
Tabela 6.26-	-Correntes de curto-circuito para uma falta bifásica-terra de <i>line out</i> da	
	SE, em módulo e em ampères	109
Tabela 6.27-	-Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica de <i>line out</i> da SE,	
	em módulo e em ampères	109
Tabela 6.28-	-Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método	
	em dois estágios, para uma ICCS de 20 k A . \ldots	110
Tabela 6.29-	-Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método	
	em dois estágios, para uma ICCS de 25 k A . \ldots	110
Tabela 6.30-	-Comparação da superação de disjuntores das duas abordagens de análise	
	para ICCS de 20 kA	113
Tabela 6.31-	-Comparação da superação de disjuntores das duas abordagens de análise	
	para ICCS de 25 kA	113
Tabela 6.32-	-Comparação entre a SE de João Câmara II antes e após sua expansão,	
	sob condição de falta monofásica e trifásica no nó n°1. \ldots	114

115
115

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3F	Trifásico
ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
ANAFAS	Análise de Faltas Simultâneas
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBIE	Centro Brasileiro de Infraestrutura
$\mathbf{C}\mathbf{C}$	Corrente Contínua
DIT	Demais Instalações da Transmissora
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
\mathbf{FF}	Fase-Fase
\mathbf{FFT}	Fase-Fase-Terra
\mathbf{FT}	Fase-Terra
GD	Geração Distribuída
ICC	Corrente de curto-circuito
ICCS	Capacidade de Interrupção Simétrica
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
LT	Linha de Transmissão
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
p.u.	Por Unidade
SE	Subestação
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SIN	Sistema Interligado Nacional
TRT	Tensão de Restabelecimento Transitória

LISTA DE SÍMBOLOS

- α Grau de Ponderação para o Filtro EWMA
- w Frequência industrial da rede
- au Constante de tempo da rede
- δ Diferença entre o ângulo de fase da tensão e o ângulo da impedância de curto-circuito da rede

SUMÁRIO

1-	$1-INTRODUÇÃO \dots 1$								
	1.1	1 Contexto e motivação							
	1.2	Objetivos							
		1.2.1	Objetivo geral						
		1.2.2	Objetivos específicos						
	1.3	Contri	buições do trabalho						
	1.4	Estrutura do documento							
2-	- FU I	NDAM	ENTAÇÃO TEÓRICA 3						
	2.1	Sistem	a Elétrico Brasileiro - SEB						
		2.1.1	Introdução						
		2.1.2	Sistema elétrico atual						
		2.1.3	Expansão do sistema elétrico						
		2.1.4	Considerações finais da seção 8						
	2.2	Modela	agem barra-ramo e no nível de seção de barras						
	2.3	Curto-	circuito						
		2.3.1 Componentes simétricas							
		2.3.2	Representação do SEP para as componentes simétricas 12						
			2.3.2.1 Diagrama de impedância de sequência positiva 12						
			2.3.2.2 Diagrama de impedância de sequência negativa 13						
			2.3.2.3 Diagrama de impedância de sequência zero						
			2.3.2.4 Equivalentes Thévenin das sequências						
		2.3.3	Curto-circuito trifásico						
		2.3.4	Curto-circuito fase-terra 18						
		2.3.5	Curto-circuito fase-fase						
		2.3.6	Curto-circuito fase-fase-terra						
		2.3.7	Fator de assimetria23						
	2.4	Teoria	de Grafos						
		2.4.1	Conceitos fundamentais						
		2.4.2	Matriz de incidência						
	2.5	Métod	o de Gauss						
		2.5.1	Casos particulares						
	2.6	Subest	ações elétricas						
		2.6.1	Classificação das subestações						
		2.6.2	Tipos de subestações						
		2.6.3	Arranjo das subestações 31						

		2.6.3.1	Barra simples
		2.6.3.2	Barra simples seccionada
		2.6.3.3	Barra principal e transferência
		2.6.3.4	Barra dupla com disjuntor simples
		2.6.3.5	Barra dupla com <i>By-pass</i>
		2.6.3.6	Barra dupla com disjuntor duplo
		2.6.3.7	Barra dupla com disjuntor e meio
		2.6.3.8	Anel simples
		2.6.3.9	Anéis múltiplos
	2.6.4	Equipan	nentos de uma subestação $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 40$
	2.6.5	Especific	cação dos equipamentos 41
2.7	Supera	ação de ec	quipamentos
	2.7.1	Disjunto	res
		2.7.1.1	Superação por corrente de curto-circuito simétrica 44
		2.7.1.2	Superação por corrente de curto-circuito assimétrica 47
	2.7.2	Métodos	s para evitar superação de equipamentos por corrente de
		curto-cir	cuito
3-AN	ÁLISE	DA SU	PERAÇÃO DE DISJUNTORES
3.1	Introd	ução	
3.2	Anális	ração de disjuntores	
	3.2.1	ONS .	
	3.2.2	ANAFA	S
3.3	Consid	lerações f	inais do capítulo
4 - FE	RRAM	ENTAS	E MÉTODOS
4.1	Metod	lologia .	
4.2	Ferran	nentas con	mputacionais
	4.2.1	ANAFA	S
	4.2.2	Python .	
	4.2.3	GNU Oo	etave
5 - DE	SCRIÇ	ZÃO DO	MÉTODO
5.1	Introd	ução	
5.2	Formu	lação do j	problema
5.3	Progra	ama	
	5.3.1	Entrada	de dados
	5.3.2	Algoritm	10
6-SIN	IULA	ÇÕES E	RESULTADOS 68
6.1	Introd	ução	

6.2	Caso de teste - SE de Cutia - $34.5 \text{ kV} \dots \dots$				
6.3	Caso de estudo - SE de João Câmara II - 230 kV				
	6.3.1	Corrente	es de falta monofásica	76	
	6.3.2	Balanço	de carga	78	
	6.3.3	Superaçã	ão de disjuntores	85	
		6.3.3.1	Análise de superação através do ANAFAS	85	
		6.3.3.2	Dois estágios - Curto-circuito na barra	86	
		6.3.3.3	Dois estágios - Curto-circuito na linha	87	
		6.3.3.4	Dois estágios - Curto-circuito de <i>line out</i>	89	
		6.3.3.5	Análise de superação através do método em dois estágios	. 91	
		6.3.3.6	Análise comparativa	92	
	6.3.4	Expansã	o do parque gerador	96	
	6.3.5	Balanço	de carga (após a expansão)	100	
	6.3.6	Superaçã	ão de disjuntores (após a expansão)	103	
		6.3.6.1	Análise de superação através do ANAFAS	103	
		6.3.6.2	Dois estágios - Curto-circuito na barra	106	
		6.3.6.3	Dois estágios - Curto-circuito na linha	106	
		6.3.6.4	Dois estágios - Curto-circuito de <i>line out</i>	108	
		6.3.6.5	Análise de superação através do método em dois estágios	109	
		6.3.6.6	Análise comparativa	110	
6.4	Análise com	e compar	parativa entre a SE de João Câmara II e sua expansão		
6.5	Consid	lerações f	inais do capítulo	116	
7 - CO	NCLU	SÃO		110	
7 1	Conclu	isões e di	scussões finais	110	
7.1	Sugest	ão de tra	halhos futuros	191	
1.2	Dugest			. 121	
Referê	ncias .			122	
ANEX	O A–	SISTEM	IA COM 67 BARRAS - 2019	126	
ANEX	0 B-	SISTEM	IA COM 73 BARRAS - 2023	127	

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto e motivação

Na modelagem barra-ramo dos sistemas elétricos de potência, como são convencionalmente representados, perde-se informações referentes às subestações dos mesmos, uma vez que toda sua configuração e estrutura são reduzidas a uma barra da rede. Esse é o caso do programa computacional ANAFAS, desenvolvido pelo CEPEL, os métodos utilizados por ele são eficientes para análise de faltas e têm sido aplicados com sucesso pelas concessionárias, porém são conservadores.

Nesse contexto, estimar as correntes de curto-circuito, que poderão circular numa subestação elétrica em uma condição de falta, trata-se de um estudo de fundamental importância para o seu planejamento e dimensionamento, uma vez que, a partir dessa análise, pode-se, por exemplo, estimar os níveis de corrente de curto-circuito incidentes em chaves e disjuntores, essencial para avaliar o seu correto e seguro funcionamento. Além disso, a partir da modelagem no nível de subestação, permite-se a verificação da superação de equipamentos ao se considerar a expansão do sistema elétrico, incluindo a instalação de novos parques geradores renováveis, como eólicos e solares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo do projeto é desenvolver um método para o cálculo de curto-circuito no nível de subestação em dois estágios, que permita estimar as correntes de falta que circulam nos ramos e dispositivos internos das SEs, e assim, possibilitando o estudo de superação dos disjuntores da subestação, assim como também avaliar o impacto da expansão na geração por fontes renováveis nos níveis da rede básica do sistema elétrico, no que concerne às situações de curto-circuito e superação de disjuntores para redes modeladas no nível de subestação.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisão dos conceitos já estudados nas disciplinas de graduação sobre modelagem de sistemas elétricos e cálculo de curto-circuito;
- Estudo sobre as topologias das subestações elétricas;
- Aprendizado do pacote computacional ANAFAS Análise de Faltas Simultâneas;
- Estudo e modelagem de redes no nível de subestação, através do desenvolvimento de rotinas para extensão dos resultados do ANAFAS, no que se refere aos equipamentos internos das subestações;

- Desenvolvimento da metodologia em dois estágios para o cálculo do curto-circuito no nível de subestações, de modo a se determinar as correntes internas às mesmas em situações de faltas, usando o ANAFAS e o Python;
- Simulações, testes e análise do cálculo de corrente de curto-circuito nos equipamentos internos das subestações, avaliando a situação de superação dos disjuntores, utilizando a metodologia proposta, para casos de estudo da sistema real;
- Simulações, testes e análise dos impactos da expansão do parque gerador para o cálculo de corrente de curto-circuito nas SEs, utilizando a metodologia proposta.

1.3 Contribuições do trabalho

Ao propor uma metodologia em dois estágios capaz de sistematizar e otimizar um processo de estimação de correntes de falta, através da conciliação a uma ferramenta computacional e comercial para análise de faltas (ANAFAS), o presente trabalho se apresenta como uma ferramenta relevante para os profissionais da área, que atuam e realizam estudos nesse segmento, bem como para as pesquisas envolvendo o tema. O trabalho será também importante para a complementação da formação acadêmica dos autores, como bacharéis em engenharia elétrica, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, pois os dados trarão resultados reais do impacto das correntes de curto-circuito nas subestações, permitindo uma perspectiva externa à academia.

1.4 Estrutura do documento

O presente trabalho estrutura-se da seguinte maneira:

No Capítulo 2, são revisados os conceitos teóricos envolvidos nos estudos referentes ao problema do curto-circuito em subestações, bem como também apresentando uma contextualização do cenário do setor energético brasileiro.

No Capítulo 3, é apresentado o método de análise de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito, de acordo com as prescrições do ONS.

No Capítulo 4, são descritos os materiais e metodologias empregados para o desenvolvimento do método proposto.

No Capítulo 5, é apresentada a formulação formal do método em dois estágios para o cálculo de curto-circuito no nível de subestação.

No Capítulo 6, são descritas as simulações realizadas, mostrando os resultados obtidos a partir da aplicação do método.

E finalmente, no Capítulo 7, são apresentadas as devidas conclusões e discussões finais referentes ao trabalho, bem como tratando de sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, será apresentada a fundamentação teórica dos conceitos que o presente trabalho aborda, revisando estudos e aprendizados adquiridos na academia, assim como também consultando materiais didáticos disponíveis na literatura.

A primeira parte deste capítulo – Seção 2.1 –, tem por objetivo estabelecer uma contextualização do setor energético brasileiro, trazendo informações sobre o perfil do SIN (Sistema Interligado Nacional) e sobre as estimativas da expansão do sistema, considerando os estudos de crescimento da demanda e da geração.

Na Seção 2.2, será descrita a modelagem convencional barra-ramo e no nível de seção de barras para sistemas elétricos, de forma a apresentar as representações de interesse para o problema abordado.

Na Seção 2.3, serão tratados os métodos de análises para o cálculo de curto-circuito nos sistemas elétricos de potência, descrevendo a metodologia convencional de solução para cada natureza de falta: trifásico, fase-fase, fase-terra ou fase-fase-terra. Na Seção 2.4, são apresentados os conceitos básicos concernentes à Teoria de Grafos e sua aplicação a problemas referentes ao setor elétrico; e na Seção 2.5 é revisado o Método de Gauss para solução de sistemas lineares com tratamento matricial.

Na Seção 2.6, serão abordados os conceitos e características concernentes às subestações de energia elétrica (SE), analisando suas estruturas e diferentes topologias, bem como também apresentando os equipamentos elétricos que as compõem, como disjuntores e demais dispositivos chaveáveis.

E finalmente, a Seção 2.7 tem por objetivo apresentar os conceitos e normas vigentes concernentes à superação dos disjuntores e dispositivos chaveáveis, descrevendo como deve ser realizada a análise dos equipamentos elétricos considerando-se suas capacidades operacionais em situações de falta, prezando pela segurança patrimonial e social.

2.1 Sistema Elétrico Brasileiro - SEB

2.1.1 Introdução

Nesta seção serão apresentadas as definições referentes ao Sistema Elétrico Brasileiro (SEB), abordando conceitos e estudos referentes à sua expansão, a partir de previsões do crescimento da demanda e da capacidade instalada de geração.

Na Subseção 2.1.2 será conceituado o SEB, utilizando as diretrizes do Atlas de energia elétrica do Brasil publicado pela ANEEL, e definindo o Sistema Interligado Nacional de acordo com o ONS, descrevendo sua importância. Além disso, será apresentada a situação atual do sistema elétrico brasileiro com relação à sua matriz energética.

Na Subseção 2.1.3, serão apresentados os estudos do Plano Decenal de Expansão

de Energia 2029, publicado pelo MME juntamente com a EPE. Esses estudos direcionam a expansão do setor elétrico nacional para próxima década. O Plano mostra que, devido a matriz energética estar se diversificando, ocorreu uma expansão considerável de parques eólicos, por isso estimulou-se que dados referentes ao crescimento dessa fonte de energia no Brasil fossem apurados.

2.1.2 Sistema elétrico atual

O Sistema Elétrico é composto pelas instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. As geradoras produzem a energia, as transmissoras realizam seu transporte e as distribuidoras levam a energia até os consumidores. Algumas indústrias, que são operadas com tensões mais elevadas, recebem energia elétrica da rede de subtransmissão (ANEEL, 2008).

O Brasil possui uma grande extensão da rede de transmissão, e isso é resultado da configuração do sistema de geração, que é constituído principalmente de usinas hidrelétricas que estão instaladas longe dos centros consumidores (geração centralizada) (ANEEL, 2008). A figura abaixo mostra o mapa do sistema de transmissão brasileiro no ano de 2019, classificada pelos níveis de tensão.



Figura 2.1 – Mapa do Sistema de Transmissão - Setembro/2019.

Fonte: (ONS, 2019c)

A geração e transmissão de eletricidade no Brasil são conectadas pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), que abrange as regiões Sul, Sudeste, Centro-Oeste, Nordeste e maior parte da região Norte (ONS, 2019d). Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em 2017 existiam mais de 140.000 km de linhas de transmissão, e a projeção para 2023 é de que existam 185.484 km de linhas. A maior parte dessas linhas são de 230 kV e 500 kV (ONS, 2017).

O SIN está na rede básica, e opera nas tensões de 230, 345, 440, 500 e 750 kV, sendo coordenado e controlado pelo ONS, realizado pelas companhias geradoras e transmissoras, e fiscalizado e regulado pela ANEEL (ANEEL, 2008).

A matriz elétrica brasileira é tradicionalmente composta de usinas hidráulicas, com importante participação de usinas térmicas. As hidrelétricas estão localizadas em regiões com regimes hidrológicos diferentes, de modo que, quando ocorre períodos de estiagem em uma região, outra região pode estar em um período chuvoso (ANEEL, 2008). A integração e transferência de energia entre subsistemas proporciona maior disponibilidade de energia do que a operação isolada de cada subsistema, o que otimiza a utilização dos recursos energéticos existentes (ONS, 2019e).

As hidrelétricas não suprem sozinhas a operação do sistema para atender a demanda do país, sendo necessário utilizar outras fontes energia. Nesse cenário, as usinas térmicas desempenham um papel fundamental para segurança e confiabilidade do SIN, em razão de estarem, geralmente, localizadas próximas aos centros de carga (ONS, 2019d).

As usinas termoelétricas são despachadas em função das condições hidrológicas vigentes, o que permite a gestão dos estoques de água armazenada nos reservatórios das usinas hidrelétricas (ONS, 2019d). Quem determina a ordem de despacho de energia é o ONS, com o objetivo de manter iguais os volumes de produção e consumo (ANEEL, 2008).

Para reduzir a dependência da geração de energia elétrica com condições hidrológicas é necessário diversificar a matriz energética nacional. Nesse contexto, houve um crescimento da instalação de usinas eólicas nos últimos anos, principalmente nas regiões Nordeste e Sul, o que destaca a importância dessa geração para o atendimento do mercado (ONS, 2019d).

2.1.3 Expansão do sistema elétrico

A expansão do setor de energia nacional é direcionado pelo Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), elaborado anualmente pela EPE, que indica as perspectivas da expansão para um horizonte de dez anos. Os estudos do PDE permitem planejar o setor de energia, de forma a aumentar a confiabilidade, reduzir os custos de produção e os impactos ambientais (MME, 2019).

Nesse plano são apresentados estudos sobre a expansão do parque de geração de energia elétrica e das principais interligações entre os subsistemas para os próximos dez anos, assim garantindo o abastecimento adequado para o crescimento da demanda de energia elétrica do SIN. É exposto também o planejamento da transmissão, que é determinado a partir da expansão da geração, de modo a garantir confiabilidade da operação e do suprimento elétrico, e a flexibilidade para comportar diferentes estratégias de implantação das fontes de geração.

A matriz energética brasileira é predominantemente renovável, e tende a preservar esse perfil nos próximos dez anos, conforme mostra a Figura 2.2. Entretanto, o sistema está passando por uma transição energética, uma vez que se prevê que a geração hidráulica irá diminuir (de 62% para 45%) sua participação de capacidade instalada no SIN, à medida que as eólicas aumentariam significativamente (de 9% para 16%) sua participação, e ainda, se prevê um crescimento da participação da energia solar, da geração distribuída renovável e das térmicas.







Com a participação das fontes não controláveis, eólicas e solares, altera-se a percepção de risco e a forma de garantir a segurança e confiabilidade da operação. Portanto, para garantir uma operação segura do suprimento, é fundamental a utilização das termelétricas a gás natural e carvão. Além disso, com a entrada da Geração Distribuída no sistema, há a exigência de uma maior flexibilidade, pois o fluxo de energia passa a ter mais de um sentido.

A oferta eólica tem se mostrado extremamente competitiva, em termos de preço de energia, frente às demais tecnologias candidatas a expansão. A previsão para 2029 é que haja um acréscimo de 24.438 MW de geração eólica, dos quais já estão contratados 3.438 MW em 130 parques no Nordeste, com o indicativo de 21.000 MW nas regiões Nordeste e Sul (MME, 2019).

De acordo com o Boletim Anual de Geração Eólica da ABEEólica, somente em 2018 foram instalados 75 novos parques eólicos na região Nordeste, totalizando de 1,94 MW. O ano de 2018 terminou com 583 usinas no total e 14,71 GW de potência eólica instalada, o que representa 9% da matriz energética brasileira (ABEEOLICA, 2018). Em 2018, o Brasil estava na oitava posição no ranking elaborado pelo GWEC (Global Wind Energy Council) com relação a capacidade total instalada, e no que se refere a capacidade instalada no ano, o Brasil aparece em quinto lugar.

A geração de energia eólica só tende a crescer no Brasil, e de acordo com o gráfico da evolução da capacidade da fonte eólica, até 2024 a sua capacidade instalada será de 19.042,3 MW. O gráfico leva em consideração o crescimento da fonte eólica em função das contratações já realizadas nos leilões regulados e no mercado livre (ABEEOLICA, 2018).



Figura 2.3 – Evolução da capacidade da Fonte Eólica (MW).

Fonte: ANEEL/ABEEólica

As eólicas são fontes de energia intermitentes, devido a sazonalidade dos ventos. Para garantir uma operação segura do SIN, é preciso recursos que assegurem a qualidade e a confiabilidade da entrega de energia ao consumidor. A coordenação da entrada em operação das novas fontes com o sistema de escoamento e conexão das mesmas à Rede Básica é essencial (ONS, 2019e).

2.1.4 Considerações finais da seção

O Sistema Elétrico Brasileiro é extenso e complexo, pois sua geração e transmissão são conectadas através do SIN, que possui dimensões continentais. Essa integração do sistema permite a transferência de energia entre subsistemas, o que otimiza a utilização dos recursos energéticos.

A matriz elétrica brasileira é dependente das usinas hidrelétricas, porém essa situação vem se alterando com o aumento da participação de novas fontes renováveis, como a eólicas e solares. Com a inserção dessas novas fontes de energia não controláveis, muda-se a forma de assegurar a operacionalidade do sistema, e por isso, é fundamental a utilização das termoelétricas para garantir a estabilidade e flexibilidade do SEB.

E importante entender como a inserção de fontes de energia não tradicionais afetam o Sistema Elétrico, como nas subestações de energia. Por isso, será analisado no Capítulo 6 como a inclusão de um parque gerador eólico afetaria os níveis de curto-circuito em uma subestação elétrica.

2.2 Modelagem barra-ramo e no nível de seção de barras

A rede elétrica, tradicionalmente, é representada por barramentos e ramos, na denominada modelagem barra-ramo. Nesse modelo, as subestações são representadas por barras, ou nós, à medida que linhas de transmissão e transformadores são representados por ramos que interligam as barras do sistema (JUNIOR; MEDEIROS, 2009). Os arranjos das subestações são previamente identificados e as seções de barras são agrupadas formando uma única barra do sistema (JUNIOR, 2005).

Existem dois métodos para análise das correntes de curto-circuito, o barra-ramo e no nível de seção de barra. Usualmente, utiliza-se o modelo barra-ramo (KOGA, 2017). Nesse modelo, as chaves e disjuntores não são retratados, simplificando a análise em regime permanente e evitando problemas numéricos decorrentes da utilização de valores atípicos de impedância para representar as posições aberto ou fechado de tais dispositivos (ROSAS; LOURENCO; FERNANDES, 2012).

Na modelagem barra-ramo não são considerados os arranjos, topologias internas e informações operacionais das subestações. O fluxo de carga e a corrente de curtocircuito através de disjuntores não podem ser determinados diretamente pelas ferramentas de análise desse modelo (LOURENCO; JUNIOR; MEDEIROS, 2010), o que requer a utilização de procedimentos complementares custosos quando há mudança na configuração ou nas informações dos componentes internos da subestação (ROSAS; LOURENCO; FERNANDES, 2012).

A análise convencional possui vantagens quanto a sua simplicidade, porém ela não avalia o arranjo e a topologia das subestações. Esse método é utilizado pelo pacote computacional ANAFAS e aplicado por diversas concessionárias de energia.

Na modelagem no nível de seção de barras, embora se traduza em maior complexidade topológica, permite-se representar explicitamente os arranjos e dispositivos chaveáveis de uma subestação correspondente ao modelo da rede (LOURENCO; JUNIOR; MEDEIROS, 2010), o que implica em maior confiabilidade e precisão dos resultados obtidos a partir de análises sob essa perspectiva.

2.3 Curto-circuito

Os sistemas trifásicos de energia elétrica são comumente representados na modelagem monofásica da rede, de modo que a análise torna-se mais ágil e simplificada, uma vez que para se determinar o estado das demais fases do sistema, basta considerar os defasamentos angulares em $\pm 120^{\circ}$ a partir da fase estudada, sabendo-se de antemão que os módulos serão os mesmos. Essa modelagem monofásica é válida apenas ao se considerar a rede elétrica como um sistema simétrico e equilibrado, ou seja, as três fases devem possuir os mesmos módulos de tensão e de corrente, e ainda, deslocadas em $\pm 120^{\circ}$ umas das outras. Uma aplicação bem convencional da representação monofásica da rede elétrica é na análise do fluxo de potência, na qual a aproximação da simetria e equilíbrio entre as fases do sistema trifásico é válida.

Os curtos-circuitos são anormalidades causadas num sistema elétrico, que podem ser resultado de situações adversas como o rompimento de uma linha de transmissão, ou a queda de uma árvore numa LT. Tratam-se de um percurso de baixa impedância para a circulação das correntes, de modo que essas, por sua vez, costumam assumir valores excedentes aos níveis nominais da rede numa situação de falta. Uma consequência direta desses distúrbios na rede, vem do fato de que os curto-circuitos provocam desbalanceamentos no sistema elétrico (KINDERMANN, 1997) — à exceção da particularidade dos curtos-circuitos trifásicos, que serão abordados na Subseção 2.3.3.

Isso posto, pode-se notar que a modelagem convencional monofásica de sistemas trifásicos, não pode ser aplicada à análise de ocorrências de falta que provocam desbalanceamentos da rede, uma vez que nessas condições, as fases podem assumir comportamentos adversos às características de um sistema simétrico e equilibrado. Assim, se faz necessário ferramentas de análise que permitam o cálculo de curto-circuito, o que conduz ao método das componentes simétricas (ROEPER, 1990), que será enunciado na sequência, bem como sua aplicação à representação e decomposição dos elementos do SEP em três componentes: impedância de sequência positiva, negativa e zero (ROEPER, 1990); e finalmente, apresentando a metodologia para solucionar o cálculo de curto-circuito para todas as situações de falta.

2.3.1 Componentes simétricas

O Teorema de Fortescue, proposto por C. L. Fortescue em 1915, apresenta o método das componentes simétricas, descrevendo que qualquer sistema polifásico desequilibrado formado por "n" fases, pode ser decomposto em "n" sistemas de fasores equilibrados (KINDERMANN, 1997). Aplicando o conceito aos sistemas trifásicos, como é o caso da rede do sistema elétrico de potência brasileiro, tem-se que as três fases que os compõem – fases A, B e C –, podem ser decompostas e representadas por três componentes fasoriais cada, denominadas sequências positiva, negativa e zero (ROEPER, 1990).

Sequência positiva: Sistema simétrico e equilibrado, com mesma sequência de fases frente ao sistema original;

Sequência negativa: Sistema simétrico e equilibrado, com sequência de fases contrária frente ao sistema original;

Sequência zero: Sistema de mesmos módulo e fase.

Dessa forma, o método enuncia que as fases originais do sistema assimétrico e desequilibrado podem ser descritas pela soma vetorial de suas três componentes decompostas. Assim, a formulação do sistema trifásico de fases ABC, decomposto pelo método das componentes simétricas, pode ser descrito pelo seguinte conjunto de expressões:

$$\dot{V}a = \dot{V}a_{1} + \dot{V}a_{2} + \dot{V}a_{0}
\dot{V}b = \dot{V}b_{1} + \dot{V}b_{2} + \dot{V}b_{0}
\dot{V}c = \dot{V}c_{1} + \dot{V}c_{2} + \dot{V}c_{0}$$
(2.1)

Onde:

- $\dot{V}a$, $\dot{V}b$, e $\dot{V}c$: Fases do sistema original, assimétrico e desequilibrado;
- $\dot{V}a_1$, $\dot{V}b_1$, e $\dot{V}c_1$: Componentes de sequência positiva, simétricas e equilibradas;
- $\dot{V}a_2$, $\dot{V}b_2$, e $\dot{V}c_2$: Componentes de sequência negativa, simétricas e equilibradas;
- $\dot{V}a_0$, $\dot{V}b_0$, e $\dot{V}c_0$: Componentes de sequência zero, de mesmos módulo e fase.

Sabendo-se que as componentes de sequência zero possuem os mesmos módulo e ângulo para cada fase do sistema, e ainda, partindo do conceito de que as componentes das sequências positiva e negativa são sistemas simétricos e equilibrados, pode-se reescrever o conjunto de expressões da Equação (2.1) em função de apenas uma das fases do sistema, como por exemplo, da fase A, considerando-se a sequência positiva direta de fase ABC:

$$\dot{V}a = \dot{V}a_0 + \dot{V}a_1 + \dot{V}a_2$$
$$\dot{V}b = \dot{V}a_0 + a^2\dot{V}a_1 + a\dot{V}a_2$$
$$\dot{V}c = \dot{V}a_0 + a\dot{V}a_1 + a^2\dot{V}a_2$$
(2.2)

Explicitando o sistema acima na forma matricial, temos que:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}a\\ \dot{V}b\\ \dot{V}c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{V}a_0\\ \dot{V}a_1\\ \dot{V}a_2 \end{bmatrix}$$
(2.3)

Onde:

- $\dot{V}a$, $\dot{V}b$, e $\dot{V}c$: Fases do sistema original, assimétrico e desequilibrado;
- $\dot{V}a_1$, $\dot{V}a_2$, e $\dot{V}a_0$: Componentes de sequências positiva, negativa e zero da fase A;
- $a = 1/120^{\circ}$: Coeficiente de defasagem em 120°;
- $a^2 = 1/240^{\circ}$: Coeficiente de defasagem em 240°.

Nota: A formulação das componentes simétricas, descritas pelo conjunto de expressões na Equação (2.2), é válida tanto para os fasores de tensão, como também para os fasores de corrente de sistemas assimétricos e desbalanceados (KINDERMANN, 1997).

Assim, formulado o método das componentes simétricas, conclui-se que mesmo sob a condição de um sistema assimétrico e desequilibrado, como ocorre em situações de curto-circuito, a solução a partir do método apresentado pode se restringir à análise de apenas uma das fases, como vemos na Equação (2.3), desde que decomposta em três componentes de fase: positiva, negativa e zero. Na Subseção 2.3.2, será apresentada a modelagem da rede elétrica para as três sequências, de modo a se possibilitar a formulação do problema e solução dos cálculos de curto-circuito.

2.3.2 Representação do SEP para as componentes simétricas

Na subseção anterior — Subseção 2.3.1 —, foi demonstrado que qualquer sistema elétrico assimétrico e desequilibrado pode ser decomposto a partir do método das componentes simétricas de Fortescue, de modo a se possibilitar a análise dos parâmetros de tensão e corrente em uma situação de falta. Nesse contexto, a necessidade passa a ser a modelagem da rede elétrica a fim de se obter as componentes de sequência do sistema. Para tanto, o sistema elétrico deverá ser representado por três diagramas de impedância distintos — para as sequências positiva, negativa e zero —, de modo que cada elemento do SEP, dada a particularidade de sua natureza, assumirá seus respectivos parâmetros de impedância e modelagem para cada uma das sequência costumam ser estruturados assumindo uma análise sem carga da rede elétrica (ROEPER, 1990). Essa aproximação é válida pois, uma vez que as grandezas envolvidas em uma ocorrência de curto-circuito atinjam valores múltiplos aos níveis nominais da rede normalmente carregada, os resultados obtidos são satisfatórios frente a uma análise integral do sistema.

2.3.2.1 Diagrama de impedância de sequência positiva

As impedâncias de sequência positiva correspondem à relação de tensão e corrente resultante da aplicação de uma fonte trifásica simétrica e equilibrada, ligada em estrela e com sequência de fases positiva direta, ao elemento que se deseja representar (ROEPER, 1990).

Para os elementos ativos do sistema elétrico, tais como geradores e motores síncronos – motores síncronos podem atuar como geradores numa situação de falta –, a modelagem de sequência positiva é obtida através de sua reatância subtransitória $(x"_d)$, em série com uma fonte de tensão $(\dot{E}a_1)$ – tensão da fase A –, sendo ambos valores nominais da máquina síncrona. A reatância subtransitória é inferior às reatâncias transitória e de regime permanente – reatância síncrona – dos geradores, de modo que, atribuindo-se o valor subtransitório à sua modelagem, suas correntes ficarão superdimensionadas, o que se traduz em maior confiabilidade de segurança no dimensionamento dos dispositivos de proteção. Já para os elementos passivos do sistema, tais como transformadores e linhas de transmissão, sua representação é dada simplesmente por uma impedância de sequência positiva – \dot{Z}_{T1} e \dot{Z}_{L1} para transformadores e LTS, respectivamente – obtidas por ensaios ou fornecidas pelo fabricante (KINDERMANN, 1997). A figura abaixo sintetiza os modelos de sequência positiva para os principais elementos que compõem o sistema elétrico: geradores síncronos, transformadores e linhas de transmissão.

Figura 2.4 – Modelos dos principais elementos do SEP para a sequência positiva. I) Gerador síncrono; II) Transformador; III) Linha de transmissão.



Fonte: Os autores.

2.3.2.2 Diagrama de impedância de sequência negativa

As impedâncias de sequência negativa correspondem à relação de tensão e corrente resultante da aplicação de uma fonte trifásica simétrica e equilibrada, ligada em estrela e com sequência de fases negativa inversa, ao elemento que se deseja representar (ROEPER, 1990).

Para os elementos ativos do sistema elétrico — como máquinas síncronas —, sua modelagem de sequência negativa é obtida através de uma impedância (geralmente dada pela reatância x_{G2}) resultante da aplicação de uma sequência de fases negativa à maquina, quando essa, por sua vez, opera em velocidade síncrona (ROEPER, 1990). Ou seja, mesmo para geradores síncronos, estes comportam-se como elementos passivos do sistema em sua representação de sequência negativa. Para os elementos passivos do sistema, sua representação é dada simplesmente por uma impedância de sequência negativa — \dot{Z}_{T2} e \dot{Z}_{L2} para transformadores e LTs, respectivamente —, cujos valores são iguais aos da sequência positiva, uma vez que, tratando-se de elementos passivos, seu comportamento manifesta-se indiferente frente a sequência de fases neles aplicados (KINDERMANN, 1997). A figura abaixo sintetiza os modelos de sequência negativa para os principais elementos que compõem o sistema elétrico: geradores síncronos, transformadores e linhas de transmissão.

Figura 2.5 – Modelos dos principais elementos do SEP para a sequência negativa. I) Gerador síncrono; II) Transformador; III) Linha de transmissão.



Fonte: Os autores.

2.3.2.3 Diagrama de impedância de sequência zero

As impedâncias de sequência zero correspondem à relação de tensão e corrente resultante da aplicação de uma fonte monofásica às três fases do elemento trifásico que se deseja representar, de modo que haja um condutor comum de retorno da corrente (ROEPER, 1990). Desta maneira, pode-se observar que a representação de sequência zero do sistema está estritamente associada aos percursos de retorno da corrente elétrica, a partir do condutor neutro ou do sistema de aterramento dos elementos do SEP.

Para as máquinas síncronas, caso estas estejam ligadas na configuração estrela aterrada, sua representação é feita a partir de um elemento passivo do sistema, sendo uma reatância de sequência zero $-x_{G0}$, dimensionada a partir de ensaios, conectando o neutro ao restante da rede. Caso o aterramento da configuração estrela seja realizado através de uma impedância \dot{Z}_N , uma vez que o condutor de terra esteja submetido a uma corrente cujo valor é a soma das três correntes circulando em cada fase - lembrando que na sequência zero, as fases A, B e C possuem mesmo módulo e fase (Subseção 2.3.1) -, a fim de manter a coerência na representação monofásica do diagrama de impedância de sequência zero, a impedância de aterramento deverá receber um fator múltiplo de três (KINDERMANN, 1997), sendo representada em série com a reatância de sequência zero da máquina síncrona.

A modelagem das linhas de transmissão no diagrama de impedâncias de sequência negativa, deve-se a uma impedância \dot{Z}_{L0} conectando as barras do sistema, sendo esta envolvida por diversos fatores em sua formulação. Uma vez que o retorno da corrente possa ocorrer em diversas circunstâncias, como por exemplo pelos cabos de cobertura da linha ou até mesmo através do solo, deve-se considerar parâmetros como a condutividade do solo e os aspectos construtivos dos cabos. Os valores de impedância podem ser estimados a partir de ensaios na linha, mas em geral, resulta em valores múltiplos – entre dois e seis – da impedância de sequência positiva da mesma (KINDERMANN, 1997). A figura abaixo sintetiza os modelos de sequência zero para as máquinas síncronas, em suas duas condições de configuração — estrela aterrada ou estrela aterrada por uma impedância —, e também para as linhas de transmissão.

Figura 2.6 – Modelos dos geradores síncronos e LTs para a sequência zero.

I) Gerador síncrono em estrela aterrada; II) Gerador síncrono em estrela aterrada através de uma impedância \dot{Z}_N ; III) Linha de transmissão.



Fonte: Os autores.

Para os transformadores de um sistema elétrico, sua modelagem de impedância na sequência zero é dada por uma reatância x_o , mensurada a partir de ensaios a que os equipamentos são submetidos, sob as condições de análise mencionadas no início dessa subseção. No entanto, para sua correta representação, deve-se considerar informações adicionais aos transformadores, tais como seus aspectos construtivos – tipo de núcleo (envolvente ou envolvido) e número de enrolamentos (dois ou três) -, e sua configuração de ligação nos lados primário e secundário – e terciário, se houver (KINDERMANN, 1997). De modo que as correntes de sequência zero correspondem àquelas relacionadas aos retornos da rede elétrica, pode-se observar que, para o caso dos transformadores, só haverá circulação de corrente de sequência zero da rede se ao menos um de seus lados apresentar conexão estrela aterrada (ROEPER, 1990), uma vez que na conexão delta, não há conexão com o neutro ou com a terra. As figuras seguintes apresentam os esquemas de representação dos transformadores de dois enrolamentos, para sua modelagem no diagrama de impedância de sequência zero, em função de suas distintas configurações de conexão do primário e do secundário, sendo a Figura 2.7 para os transformadores de núcleo envolvente, e a Figura 2.8 para os transformadores de núcleo envolvido.

Figura 2.7 – Esquema de conexão dos transformadores de núcleo envolvente de dois enrolamentos, para a sequência zero.



Fonte: Os autores.

Figura 2.8 – Esquema de conexão dos transformadores de núcleo envolvido de dois enrolamentos, para a sequência zero.



Fonte: Os autores.

2.3.2.4 Equivalentes Thévenin das sequências

Uma vez estruturados os diagramas de impedância da rede elétrica, conforme orientações apresentadas nos itens anteriores desta subseção, o próximo passo que precede a efetiva análise das situações de falta, será a determinação dos equivalentes de Thévenin para cada sequência — positiva, negativa e zero —, como mostra a figura a seguir.

Figura 2.9 – Circuitos equivalentes Thévenin na barra "k" da rede elétrica, para as três sequências.



Fonte: Os autores.

Essa redução representativa da rede é feita pois, a partir dos equivalentes de Thévenin das três sequências, permite-se aplicar as condições de contorno do curto-circuito que se deseja analisar – conforme será apresentada na próxima subseção –, e possibilitando assim determinar os parâmetros envolvidos numa falta ocorrida no ponto de defeito em que o equivalente foi realizado, sendo em barras ou pontos intermediários entre barras do sistema (KINDERMANN, 1997). Desta forma, é usual determinar-se as matrizes impedância de barra do sistema – uma para cada sequência: \dot{Z}_{Barra}^1 , \dot{Z}_{Barra}^2 e \dot{Z}_{Barra}^0 –, pois a partir destas, por sua vez, seus elementos presentes nas diagonais principais referemse às impedâncias equivalentes de Thévenin da rede para cada barra do sistema, o que possibilita a análise de curto-circuito para toda a extensão da rede elétrica. Para a obtenção das respectivas matrizes de impedância, pode-se calculá-las através da inversão das matrizes de admitância da rede, todavia, esse método requer um elevado custo computacional para sistemas de grande porte. Assim, há métodos alternativos, como o método da matriz \dot{Z}_{Barra} , e o método das matrizes esparsas (SATO; FREITAS, 2015).

2.3.3 Curto-circuito trifásico

Uma ocorrência de falta trifásica ocorre quando as três fases da rede elétrica são curto-circuitadas, podendo ou não estar em contato com a terra. Uma vez que os efeitos do curto são os mesmos para as três fases, um curto trifásico trata-se de uma ocorrência que não provoca desequilíbrio ou assimetria ao sistema, sendo interpretada como uma carga simétrica (ROEPER, 1990). Isso posto, como a referência de tensão para cada fase trata-se do potencial terra, ao ocorrer uma situação de curto-circuito trifásico, o ponto de falta assumirá o valor de tensão do ponto de referência, o que explica a razão de ser indiferente a conexão com a terra ou não durante a falta (KINDERMANN, 1997). Além disso, estando as três fases simétricas e equilibradas, não haveria passagem de corrente para a terra no ponto de curto-circuito mesmo que houvesse conexão com esta. Assim, as condições de contorno para uma falta trifásica são dadas por:

$$\dot{V}a = \dot{V}b = \dot{V}c = 0 \tag{2.4}$$

A partir das condições de contorno acima apresentadas, pode-se aplicá-las na Equação (2.3) que relaciona os parâmetros de fase e suas componentes simétricas, possibilitandose estruturar o seguinte circuito equivalente para um curto-circuito trifásico ocorrido na barra "k" do sistema:

Figura 2.10 – Circuito equivalente para uma falta trifásica na barra "k".



Fonte: Os autores.

Ou seja, em um curto-circuito trifásico, só existe a participação ativa das componentes de sequência positiva do sistema. Assim, analisando o circuito equivalente da Figura 2.10, podemos descrever a equação de corrente para uma falta trifásica numa barra genérica "k" da rede elétrica:

$$\dot{I}a_k = \frac{\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^1} \tag{2.5}$$

Onde:

- Ia_k : Corrente de curto-circuito 3F da fase A na barra "k";
- $\dot{V}a_k^{pre-falta}$: Tensão da fase A na barra "k" antes da ocorrência da falta 3F;
- \dot{Z}^1_{kk} : Impedância equivalente Thevénin na barra "k" de sequência positiva, correspondente à posição "kk" da matriz de impedância do sistema.

2.3.4 Curto-circuito fase-terra

Uma situação de falta monofásica ocorre quando uma das fases do sistema é curto-circuitada para a terra. Considerando que a fase A seja afetada pela falta, isso impõe as seguintes condições de contorno, assumindo a análise do sistema em condição sem carga:

$$\dot{V}a = 0 \tag{2.6}$$

$$\dot{I}b = \dot{I}c = 0 \tag{2.7}$$

A partir das condições acima apresentadas, pode-se aplicá-las na Equação (2.3) que relaciona os parâmetros de fase e suas componentes simétricas, possibilitando-se estruturar o seguinte circuito equivalente para um curto-circuito fase-terra ocorrido na barra "k" do sistema:

Figura 2.11 – Circuito equivalente para uma falta fase-terra na barra "k".



Fonte: Os autores.

Pode-se notar que a representação de uma falta monofásica equivale a uma associação em série entre as três sequências. Desta forma, analisando o circuito equivalente acima — Figura 2.11 —, pode-se escrever as expressões das componentes simétricas dos parâmetros de corrente e tensão, para uma situação de falta monofásica da fase A, em uma barra genérica "k" do sistema elétrico:

$$\dot{I}a_k^1 = \dot{I}a_k^2 = \dot{I}a_k^0 = \frac{\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.8)

$$\dot{V}a_k^1 = \dot{V}a_k^{pre-falta} * \frac{\dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.9)

$$\dot{V}a_k^2 = -\dot{V}a_k^{pre-falta} * \frac{\dot{Z}_{kk}^2}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.10)

$$\dot{V}a_k^0 = -\dot{V}a_k^{pre-falta} * \frac{\dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.11)

Onde:

- $\dot{V}a_k^{pre-falta}$: Tensão da fase A na barra "k" antes da ocorrência da falta FT;
- Ia_k^1 , $Ia_k^2 \in Ia_k^0$: Correntes de curto-circuito FT da fase A na barra "k", de sequências positiva, negativa e zero, respectivamente;
- $\dot{V}a_k^1$, $\dot{V}a_k^2$ e $\dot{V}a_k^0$: Tensões de curto-circuito FT da fase A na barra "k", de sequências positiva, negativa e zero, respectivamente;
- \dot{Z}_{kk}^1 , \dot{Z}_{kk}^2 e \dot{Z}_{kk}^0 : Impedâncias equivalente Thevénin na barra "k" de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, correspondentes à posição "kk" das matrizes de impedância do sistema.

2.3.5 Curto-circuito fase-fase

Uma situação de falta bifásica fase-fase ocorre quando duas das fases do sistema são curto-circuitadas, sem contato com a terra. Considerando que o curto tenha ocorrido entre as fases B e C, isso impõe as seguintes condições de contorno, assumindo a análise do sistema em condição sem carga:

$$\dot{V}b = \dot{V}c \tag{2.12}$$

$$\dot{I}a = 0 \tag{2.13}$$

$$\dot{I}b = -\dot{I}c \tag{2.14}$$

A partir das condições acima apresentadas, pode-se aplicá-las na Equação (2.3) que relaciona os parâmetros de fase e suas componentes simétricas, possibilitando-se estruturar o seguinte circuito equivalente para um curto-circuito fase-fase ocorrido na barra "k" do sistema:

Figura 2.12 - Circuito equivalente para uma falta fase-fase na barra "k".



Fonte: Os autores.
Nota-se que a representação de uma falta bifásica fase-fase, equivale a uma associação em paralelo entre as sequências positiva e negativa, e ainda, nota-se também que não há participação ativa da sequência zero, o que se traduz pela ausência da conexão com o terra no ponto de falta. Desta forma, analisando o circuito equivalente acima — Figura 2.12 —, pode-se escrever as expressões das componentes simétricas dos parâmetros de corrente e tensão, para uma situação de falta bifásica entre as fases B e C, em uma barra genérica "k" do sistema elétrico:

$$\dot{V}a_k^1 = \dot{V}a_k^2 = \dot{V}a_k^{pre-falta} * \frac{Z_{kk}^2}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2}$$
(2.15)

$$\dot{V}a_k^0 = 0 \tag{2.16}$$

$$\dot{I}a_k^1 = -\dot{I}a_k^2 = \frac{\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2}$$
(2.17)

$$\dot{I}a_k^0 = 0$$
 (2.18)

Onde:

- $\dot{V}a_k^{pre-falta}$: Tensão da fase A na barra "k" antes da ocorrência da falta FF;
- $\dot{I}a_k^1$, $\dot{I}a_k^2$ e $\dot{I}a_k^0$: Correntes de curto-circuito FF da fase A na barra "k", de sequências positiva, negativa e zero, respectivamente;
- Va_k^1 , Va_k^2 e Va_k^0 : Tensões de curto-circuito FF da fase A na barra "k", de sequências positiva, negativa e zero, respectivamente;
- \dot{Z}_{kk}^1 e \dot{Z}_{kk}^2 : Impedâncias equivalente Thevénin na barra "k" de sequência positiva e negativa, respectivamente, correspondentes à posição "kk" das matrizes de impedância do sistema.

2.3.6 Curto-circuito fase-fase-terra

Uma situação de falta bifásica fase-fase-terra ocorre quando duas das fases do sistema são curto-circuitadas, existindo ainda uma conexão com o potencial terra. Considerando que o curto tenha ocorrido entre as fases B e C, isso impõe as seguintes condições de contorno, assumindo a análise do sistema em condição sem carga:

$$\dot{V}b = \dot{V}c = 0 \tag{2.19}$$

$$\dot{I}a = 0 \tag{2.20}$$

A partir das condições acima apresentadas, pode-se aplicá-las na Equação (2.3) que relaciona os parâmetros de fase e suas componentes simétricas, possibilitando-se estruturar

o seguinte circuito equivalente para um curto-circuito fase-fase-terra ocorrido na barra "k" do sistema:

Figura 2.13 – Circuito equivalente para uma falta fase-fase-terra na barra "k".



Fonte: Os autores.

Pode-se notar que a representação de uma falta bifásica fase-fase-terra, equivale a uma associação em paralelo entre as três sequências. Desta forma, analisando o circuito equivalente acima — Figura 2.13 —, pode-se escrever as expressões das componentes simétricas dos parâmetros de corrente e tensão, para uma situação de falta bifásica com conexão à terra entre as fases B e C, em uma barra genérica "k" do sistema elétrico:

$$\dot{V}a_k^1 = \dot{V}a_k^2 = \dot{V}a_k^0 = \dot{V}a_k^{pre-falta} * \frac{\dot{Z}_{kk}^2 || \dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 || \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.21)

$$\dot{I}a_k^1 = \frac{\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 || \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.22)

$$\dot{I}a_k^2 = \frac{-\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^2} * \frac{\dot{Z}_{kk}^2}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2} ||\dot{Z}_{kk}^0$$
(2.23)

$$\dot{I}a_k^0 = \frac{-\dot{V}a_k^{pre-falta}}{\dot{Z}_{kk}^0} * \frac{\dot{Z}_{kk}^2 || \dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^1 + \dot{Z}_{kk}^2 || \dot{Z}_{kk}^0}$$
(2.24)

Onde:

- $\dot{V}a_k^{pre-falta}$: Tensão da fase A na barra "k" antes da ocorrência da falta FFT;
- *İa*¹_k, *İa*²_k e *İa*⁰_k: Correntes de curto-circuito FFT da fase A na barra "k", de sequências
 positiva, negativa e zero, respectivamente;
- $\dot{V}a_k^1$, $\dot{V}a_k^2$ e $\dot{V}a_k^0$: Tensões de curto-circuito FFT da fase A na barra "k", de sequências positiva, negativa e zero, respectivamente;
- \dot{Z}_{kk}^1 , \dot{Z}_{kk}^2 e \dot{Z}_{kk}^0 : Impedâncias equivalente Thevénin na barra "k" de sequência positiva, negativa e zero, respectivamente, correspondentes à posição "kk" das matrizes de impedância do sistema.

2.3.7 Fator de assimetria

As ferramentas de análise discutidas até aqui, envolvendo os cálculos de curtocircuito, tratam das correntes de falta considerando o seu comportamento em regime permanente e estabilizado. Todavia, no instante em que o defeito ocorre, as correntes da rede passam por um período transitório, de modo que essas, por sua vez, assumem valores de pico excedentes aos estimados para o regime permanente. Desta forma, pode-se descrever a corrente de curto-circuito total – referida por corrente assimétrica –, através de uma superposição de duas componentes: uma parcela alternada e de regime permanente – cuja corrente foi alvo de estudo nas subseções anteriores –, e outra sendo uma parcela exponencial decrescente de caráter contínuo (KINDERMANN, 1997). Dessa forma, como a componente contínua da corrente assimétrica decresce com o tempo, esta se extingue após um dado intervalo, restando apenas a componente simétrica alternada, assumindo portanto o regime permanente.

Os níveis que as aferidas correntes assimétricas assumem, bem como seus intervalos de atuação durante o período transitório, estão intimamente associados à relação X/R da rede elétrica no ponto de curto, determinada pelo equivalente do sistema — sendo R e X as parcelas real/resistiva e imaginária/reativa, respectivamente, da impedância equivalente de Thévenin da rede. O valor máximo que o pico da corrente assimétrica de curto-circuito pode assumir no regime transitório, pode ser estimado a partir das expressões descritas pela Equação (2.25) e Equação (2.26) (SATO; FREITAS, 2015).

$$FA = 1 + \sin\left(\arctan\frac{X}{R}\right) * e^{-\left(\frac{\frac{\pi}{2} + \arctan\frac{X}{R}}{\frac{X}{R}}\right)}$$
(2.25)

$$I_{assim.}^{max} = \sqrt{2} * FA * I_{cc} \tag{2.26}$$

Onde:

- FA: Fator de assimetria;
- R: Componente real da impedância equivalente da rede;
- X: Componente imaginária da impedância equivalente da rede;
- I_{cc} : Valor eficaz da corrente simétrica no ponto de falta, em regime permanente;
- I_{assim}^{max} : Valor de pico máximo da corrente assimétrica no ponto de falta.

A necessidade de se mensurar as valores que as correntes assimétricas podem assumir numa situação de falta, deve-se principalmente ao dimensionamento dos equipamentos de proteção, tais como disjuntores (KINDERMANN, 1997), de modo que estes deverão ser projetados para suportar as correntes incidentes no regime transitório. Além disso, os disjuntores devem ser dimensionados de forma a se eliminar o defeito ainda no período de transição do curto-circuito, antes mesmo de efetivamente ingressar no regime permanente.

Considerações finais da seção: O método apresentado para a determinação dos parâmetros de correntes e tensões numa situação de falta, retorna informações do ponto de defeito em questão, de modo que, para se mensurar o estado geral da rede nessa condição, faz-se necessário realizar uma análise regressa, partindo-se da barra ou LT em que ocorreu o curto-circuito, em direção ao restante do sistema elétrico (KINDERMANN, 1997). Nesse processo, deve-se considerar os defasamentos angulares das correntes de linha onde existirem transformadores conectados em estrela-delta, de modo que as correntes de sequência positiva do lado delta estarão adiantadas em $+30^{\circ}$ em relação às correntes do lado delta estarão atrasadas em -30° em relação às correntes do lado estrela.

2.4 Teoria de Grafos

Atribui-se ao matemático Leonhard Euler a primeira formulação prática, durante o século XVIII, de um problema envolvendo o que passou a ser referido por Teoria de Grafos (NETTO, 2006). Trata-se de um ramo da matemática cuja abordagem pode ser aplicada em várias situações possíveis, como na matemática propriamente dita, nas engenharias, na informática, na psicologia, e diversas outras áreas. No que concerne aos problemas elétricos, por exemplo, foi o físico Gustav Kirchhoff quem primeiramente importou as ideias de Grafos para os âmbitos dos circuitos elétricos, em 1847 (NETTO, 2006). Um dos grandes motivadores dessa teoria consiste no fato de permitir sua implementação em algoritmos computacionais, e assim, pode-se estabelecer uma relação proporcional do grau de complexidade dos problemas estudados a partir de Grafos, com a capacidade de processamento computacional das máquinas. Nesta seção, serão apresentadas as definições básicas envolvendo a Teoria de Grafos, de modo a fundamentar os respectivos conceitos empregados na formulação do método proposto pelo presente trabalho.

2.4.1 Conceitos fundamentais

A Teoria de Grafos aborda a relação de objetos de um determinado conjunto discreto. Nesse sentido, um grafo G consiste em uma estrutura que é definida por:

$$G = (V, E) \tag{2.27}$$

Onde:

- $G \rightarrow$ Grafo;
- $V \rightarrow$ Conjunto discreto e arbitrário, cujos elementos são tratados como vértices;
- $E \rightarrow$ Subconjunto de V, cujos elementos são tratados como arestas.

Desta forma, um grafo trata-se de uma estrutura formada por objetos de um determinado conjunto, representados pelos vértices V (também chamados de nós ou pontos), e o subconjuntos das arestas E que indicam as conexões ou relações de adjacência entre os objetos do conjunto, sendo portanto uma função dos vértices (NETTO, 2006). Considerando uma aresta que interliga dois vértices V_1 e V_2 de um determinado conjunto, isso implica que ambos os vértices são vizinhos ou adjacentes entre si (FEOFILOFF; KOHAYAKAWA; WAKABAYASHI, 2011).

Um grafo pode ser classificado como não orientado e orientado¹. Um grafo é dito não orientado, quando suas arestas são apenas linhas que conectam os vértices; já no caso dos grafos orientados, são aqueles em que suas arestas indicam um sentido início-fim entre os vértices, representados por setas ou arcos.



Figura 2.14 – Tipos de grafos.

Fonte: Os autores.

Os grafos mostrados acima são representações esquemáticas dos mesmos, o que em muitas ocasiões pode ser útil a fim de ilustrar o problema em que se deseja estudar. No entanto, uma representação esquemática pode ser inviável ou mesmo impossível de se reproduzir em problemas cuja complexidade seja elevada, e ainda, considerando sua implementação em algoritmos computacionais envolvendo estruturas de grafos, tornase necessário uma representação numérica adequada para sua leitura pelo computador (NETTO, 2006). Nesse sentido, foram desenvolvidos meios de representação de grafos a partir de formas matemáticas, de modo que se destacam as estruturas matriciais, como por exemplo, matrizes de adjacência e de valores, matrizes figurativas e as matrizes de incidência. Neste trabalho, trataremos apenas da última das representações citadas.

2.4.2 Matriz de incidência

A matriz de incidência A trata-se de uma matriz de dimensão $n \ge m$, onde n é o número de vértices, e m é o número de arestas do conjunto. Cada linha está associada a

¹Existem ainda os hipergrafos e multigrafos, porém não serão abordados neste texto.

um dos vértices do conjunto, e analogamente, cada coluna está associada a uma das arestas do mesmo. Nesse sentido, nota-se que cada elemento da matriz de incidência relaciona o vértice e a aresta da estrutura de grafos referentes ao seu posicionamento matricial. No caso de grafos orientados, a formação da matriz de incidência é elaborada partindo-se do seguinte critério:

- $A_{ij} = 0$, se a aresta j não estiver conectada ao vértice i;
- $A_{ij} = +1$, se a aresta *j* estiver conectada ao vértice *i*, no sentido de estar saindo deste vértice;
- $A_{ij} = -1$, se a aresta *j* estiver conectada ao vértice *i*, no sentido de estar entrando neste vértice.

Tomando como exemplo o caso de grafo orientado apresentado na Figura 2.14, segue abaixo sua matriz de incidência correspondente.



Figura 2.15 – Matriz de incidência.



Partindo-se da definição de que uma aresta só pode estar associada a dois vértices do conjunto, nota-se que cada coluna da matriz de incidência apresentará apenas dois elementos não-nulos, e ainda, no caso particular dos grafos orientados, o somatório de todos elementos de cada coluna será zero, uma vez que a aresta deve estar entrando (-1) e saindo (+1) em um par de vértices associados. Desta forma, tem-se que o somatório de todas as linhas da matriz tem por resultado uma linha nula, o que implica em uma dependência linear entre as linhas do sistema, que traduz-se em redundância, e assim, indica que uma das linhas pode ser descartada (FOLETTO, 2019). Tal dependência linear será explorada mais detalhadamente na seguinte seção.

2.5 Método de Gauss

Seja um sistema linear composto por m equações e n incógnitas, onde x_j são as variáveis independentes, a_{ij} são os coeficientes destas, e b_i são os termos independentes

das equações. O sistema pode ser descrito pelo seguinte conjunto de expressões.

$$a_{11}x_{1} + a_{12}x_{2} + \dots + a_{1n}x_{n} = b_{1}$$

$$a_{21}x_{1} + a_{22}x_{2} + \dots + a_{2n}x_{n} = b_{2}$$

$$\vdots$$

$$a_{m1}x_{1} + a_{m2}x_{2} + \dots + a_{mn}x_{n} = b_{m}$$
(2.28)

O sistema acima pode ser representado na forma matricial, conforme se segue.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{bmatrix}$$
(2.29)

E ainda, é comum representarmos o sistema matricial acima por apenas uma matriz que contenha os coeficientes das incógnitas à sua esquerda, e os termos independentes (elementos do lado direito da igualdade) à sua direita, separados por um traçado divisor. Essa nova matriz é chamada de *matriz aumentada* (LEON, 2008), e é apresentada a seguir.

$$\begin{pmatrix}
a_{11} & \dots & a_{1n} & b_1 \\
\vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\
a_{m1} & \dots & a_{mn} & b_m
\end{pmatrix}$$
(2.30)

A partir da matriz aumentada acima, deseja-se encontrar a solução do sistema, ou seja, determinar o vetor de incógnitas \overline{x} que satisfaça todas as expressões do conjunto. Uma das formas de solucionar o sistema trata-se do **método de Gauss**, que consiste em realizar operações elementares entre as linhas da matriz aumentada, de modo a preservar a linearidade e as relações referentes ao sistema original. Tais operações são listadas a seguir:

- I. Trocar duas linhas;
- II. Multiplicar uma linha por um número real e não-nulo;
- III. Substituir uma linha por sua soma com um múltiplo de outra linha.

O objetivo dessas operações consiste em partir da matriz aumentada, para uma matriz referida por *forma escada* (LEON, 2008), cuja forma pode ser representada pela seguinte matriz conforme mostrada abaixo, considerando um sistema de 4 equações e 4 incógnitas.

$$\begin{pmatrix}
X & X & X & X & | & X \\
0 & X & X & X & | & X \\
0 & 0 & X & X & | & X \\
0 & 0 & 0 & X & | & X
\end{pmatrix}$$
(2.31)

Desta maneira, estando a matriz aumentada no formato acima apresentado, com elementos nulos abaixo de sua diagonal principal, admite-se que o sistema possui solução única. E ainda, a solução pode ser extraída facilmente, partindo-se da última expressão para a primeira, determinando x_4 , x_3 , x_2 e x_1 , nessa ordem.

2.5.1 Casos particulares

I. Sistema incompatível

Considere um sistema linear 4x4, cuja matriz aumentada, após realizadas as operações elementares entre suas linhas, tenha apresentado o seguinte resultado:

Conforme se observa pela última linha da matriz aumentada, não há solução factível para o sistema, uma vez que não existe um vetor de solução \overline{x} capaz de satisfazer a última equação, considerando X um elemento real e não-nulo.

II. Soluções infinitas

Considere novamente um sistema linear 4x4, cuja matriz aumentada tenha apresentado o seguinte resultado:

Observando a última linha, além dos coeficientes do vetor \overline{x} terem resultado em valores nulos, o seu correspondente de termo independente da equação também foi igual a zero. Nesse caso, a última linha é considerada uma linha redundante do sistema, uma vez que qualquer vetor de solução \overline{x} é capaz de satisfazer essa equação. Desta forma, a linha redundante pode ser descartada, e assim, o sistema passa a conter menos equações do que incógnitas (3x4), implicando que este apresenta infinitas soluções.

III. Linha(s) redundante(s)

Por fim, considere um sistema linear 5x4, ou seja, com mais equações do que incógnitas, cuja matriz aumentada tenha apresentado o seguinte resultado:

Semelhante ao caso anterior, a matriz aumentada apresentou uma linha nula, de modo que esta é tida como redundante, e passível de ser descartada do sistema. No entanto, ao descartá-la, tem-se um sistema de mesmo número de equações e incógnitas, e ainda, estando este no mesmo formato que o desejado para obtenção da solução do problema, conforme mostra a Equação (2.31), assume-se então que o sistema possui solução única.

2.6 Subestações elétricas

As subestações fazem parte dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Segundo o PRODIST, ela é um "conjunto de instalações elétricas em média ou alta tensão que agrupa os equipamentos, condutores e acessórios, destinados à proteção, medição, manobra e transformação de grandezas elétricas." (ANEEL, 2011).

As redes de transmissão fazem o transporte da eletricidade por longas distâncias, sob a forma de alta tensão para minimizar as perdas, das usinas geradoras até os consumidores (CBIE, 2019). Durante esse trajeto, a energia elétrica passa por inúmeras subestações que, através dos transformadores, regulam a tensão. Perto dos centros de consumo, a tensão é rebaixada nas subestações para que haja a distribuição de energia na região.

As subestações alteram as características da energia elétrica — tensão e corrente —, permitindo sua distribuição em níveis compatíveis para utilização nos pontos de entrega ao consumidor (FILHO, 2017).

2.6.1 Classificação das subestações

As subestações podem ser classificadas quanto à sua função no sistema elétrico e a instalação dos seus equipamentos. No que se refere à sua função, ela pode ser transformadora ou de controle e manobra.

A subestação transformadora é aquela que altera o nível de tensão, podendo ser Elevadora ou Abaixadora. Usualmente, as SEs elevadoras estão próximas às usinas geradoras, enquanto as abaixadoras se localizam próximas aos centros consumidores (DUALIBE, 1999). As subestações de controle e manobra mantém o nível de tensão, sendo designadas a controlar qualquer das grandezas de energia elétrica, ligar ou desligar circuitos elétricos ou, ainda, prover meios de proteção para eles, segundo a NBR 14039 no item 9.5.1 (NBR-14039, 2005).

No que se refere à função da subestação, ela pode ser de transmissão, conectada às LTs que transportam grandes blocos de energia, ou de distribuição, geralmente com abaixamento da tensão. Em relação ao modo de instalação, ela pode ser abrigada ou ao tempo, e quanto à sua posição no solo, ela pode ser instalada na superfície, subterrânea ou aérea (NBR-14039, 2005).

Na subestação ao tempo, seus equipamentos estão sujeitos aos efeitos atmosféricos, por isso todo equipamento deve ser resistente a esses efeitos que causam desgaste nos materiais e exigem manutenções mais frequentes. As subestações abrigadas ou internas são instaladas em locais protegidos das condições intempéries, como em uma edificação ou uma câmara subterrânea (DUALIBE, 1999).

2.6.2 Tipos de subestações

Segundo o livro Instalações Elétricas Industriais, de J. Mamede Filho, existem quatro principais tipos de subestações: a central de transmissão; a receptora de transmissão; de subtransmissão; e do consumidor (FILHO, 2017).

A subestação central de transmissão é, normalmente, construída próxima à usina geradora de eletricidade, e seu objetivo é elevar o nível de tensão fornecido pelos geradores para transmissão dessa energia.

A subestação receptora de transmissão é aquela próxima aos grandes blocos de carga, e está conectada à subestação central de transmissão ou à outra subestação receptora intermediária.

As subestações de subtransmissão estão localizadas próximas aos centros de carga, geralmente dentro ou próximas aos bairros em que fornecem energia (MCDONALD, 2012). Elas são alimentadas pela subestação receptora e de onde se originam os alimentadores de distribuição primários, suprindo diretamente os transformadores de distribuição e/ou as subestações de consumidor.

A subestação do consumidor funciona como fonte de fornecimento de energia elétrica para o cliente final (MCDONALD, 2012). Ela é abastecida por alimentadores de distribuição primários, originados das subestações de subtransmissão.

Na Figura 2.16 está demonstrado um sistema simplificado com os tipos de subestações, desde a geração de energia elétrica até o consumidor final. Subestação central de transmissão

Linha de transmissão

Subestação receptora de transmissão

Geração





Fonte: Mamede Filho, J. Instalações Elétricas Industriais.

Linha de subtransmissão

2.6.3Arranjo das subestações

Nesta subseção serão examinados os diferentes arranjos das subestações, considerando as suas características de funcionamento e operação.

2.6.3.1Barra simples

A configuração de subestação de barra simples está mostrada na Figura 2.17. Essa configuração apresenta algumas vantagens, como menor área necessária, instalações simples, ligar e desligar circuitos alimentadores e custo reduzido. No entanto, se houver falha, seja no disjuntor ou no barramento, a subestação é desligada (FOLETTO, 2019).

A manutenção dos disjuntores e barras não pode ser realizada sem interromper o fornecimento de energia na subestação, fazendo com que a proteção e a seletividade do circuito seja perdida ao desligar todos os circuitos (FOLETTO, 2019).

Subestação de consumidor

Alimentador de distribuição

Indústria

-



Figura 2.17 – Arranjo barra simples.

Fonte: (MUZY, 2012)

Nas condições de operação, a ligação da subestação deve ser feita sempre fechando as chaves antes dos disjuntores, pois aquelas não podem ser ligadas em carga. Essa configuração tem um funcionamento simples e direto (FOLETTO, 2019).

Em caso de um defeito de um circuito, o disjuntor é aberto, depois as chaves são abertas para a manutenção e, só então, o circuito é religado. Se houver defeito em uma barra, a proteção mais próxima irá atuar, abrindo os disjuntores dos circuitos ligados a ela. Após a manutenção, fecham-se as chaves e em seguida os disjuntores para religação (MUZY, 2012).

2.6.3.2 Barra simples seccionada

A configuração de barra simples seccionada está ilustrada na Figura 2.18. Esse arranjo é indicado para funcionar com duas fontes de energia, permitindo a manutenção de barra sem perda da subestação, possibilitando maior continuidade no fornecimento e facilidade na manutenção (FOLETTO, 2019).

Não é possível transferir uma linha de uma barra para a outra, a manutenção de um disjuntor deixa fora de serviço a linha correspondente e o esquema de proteção é mais complexo. O seccionador não deve ser operado em carga, por isso há a necessidade de um disjuntor, e isso resulta em ganho na seletividade e proteção, reduzindo o nível de curto-circuito, de dimensionamento e o custo de instalação (MUZY, 2012).



Figura 2.18 – Arranjo barra simples seccionada.

Fonte: (MUZY, 2012)

As condições de operação são semelhantes ao arranjo barra simples. Essa configuração é indicada para as operações de manutenção ou religação de trechos da subestação, assim parte da carga não será cortada (MUZY, 2012).

Em caso de defeito em um circuito, a operação é similar ao arranjo da barra simples, e na ocorrência de falta em uma barra abre-se a chave do lado onde houve a contingência para manutenção, fecha-se a chave e o disjuntor, e restabelece a energia na subestação (MUZY, 2012).

2.6.3.3 Barra principal e transferência

O arranjo barra principal e transferência, representado na Figura 2.19, permite a manutenção dos disjuntores com continuidade. Se for necessária a manutenção de algum disjuntor, fecha-se o secionador *by-pass* para que atue o disjuntor de transferência. A manutenção é realizada um disjuntor por vez (FOLETTO, 2019).

Os benefícios dessa configuração são que qualquer disjuntor pode ser retirado para manutenção, e equipamentos podem ser adicionados ou retirados com facilidade. No entanto, há a necessidade de um disjuntor reserva, e para a manutenção, são necessárias manobras mais complexas e, na ocorrência de falha no barramento ou no disjuntor, isso resulta no desligamento da subestação (MUZY, 2012).



Figura 2.19 – Arranjo barra principal e transferência.

Fonte: (MUZY, 2012)

A barra de transferência é mantida desenergizada em condição de operação, utilizando-se somente em manobras de manutenção ou restabelecimento da operação normal da subestação devido à contingência (FOLETTO, 2019).

Na ocorrência de um defeito em um circuito pode-se colocar, provisoriamente, esse circuito na barra de transferência, caso o defeito já tenha sido extinguido, ou apenas restabelecer o circuito na barra principal, fechando as chaves e em seguida o disjuntor. Se ocorrer um defeito em uma barra, toda subestação sai de operação, pois a barra de transferência é apenas para manobras (MUZY, 2012).

2.6.3.4 Barra dupla com disjuntor simples

A Figura 2.20 mostra o arranjo barra dupla com disjuntor simples. Essa configuração tem uma flexibilidade na operação com ambas as barras em operação. As suas vantagens são operação com cargas e fontes distribuídas; e a facilidade de transferência dos circuitos de uma barra para outra. Porém, há a necessidade um disjuntor extra para conexão com a outra barra; a proteção do barramento pode causar a perda da subestação quando esta operar com todos os circuitos num único barramento; há alta exposição a falhas no barramento; e uma falha no disjuntor de transferência pode deixar a subestação fora do ar (FOLETTO, 2019), (MUZY, 2012).



Figura 2.20 – Arranjo barra dupla com disjuntor simples.

Fonte: (MUZY, 2012)

Ambas as barras podem estar energizadas ao mesmo tempo em condições de operação, se elas tiverem o mesmo nível de tensão. A vantagem é a operação para cargas e pontos distribuídos para ambas as barras, consequentemente a flexibilidade de operação na subestação aumenta (FOLETTO, 2019).

Para manutenção no disjuntor, é necessário o desligamento do circuito, e para manutenção nas barras, não há necessidade de desligamento da subestação. No caso de defeito em um circuito, a operação do resto da subestação não é afetada, e quando uma falta ocorre em uma barra, os circuitos ligados a ela devem ser desenergizados (MUZY, 2012).

2.6.3.5 Barra dupla com *By-pass*

A configuração de barra dupla com *by-pass* pode ser em quatro ou cinco chaves, conforme destacado na Figura 2.21 e Figura 2.22. Esse arranjo apresenta um custo mais elevado e alto número de operações devido ao número de disjuntores, mas a manutenção de barra e de disjuntores é mais vantajosa (FOLETTO, 2019).



Figura 2.21 – Arranjo barra dupla com By-pass.



Figura 2.22 – Arranjo barra dupla com By-pass.



Fonte: (MUZY, 2012)

Essa configuração possui bastante flexibilidade de operação, pois o circuito pode passar de uma barra para outra sem o desligamento. Se ocorrer uma falta no circuito, a atuação da proteção tira o circuito de operação, e os demais circuitos e a subestação não são afetados. Uma falha na barra desenergiza todos os circuitos ligados a ela (MUZY, 2012).

2.6.3.6 Barra dupla com disjuntor duplo

O arranjo de barra dupla com disjuntor duplo está demonstrado na Figura 2.23. As vantagens dessa configuração são a sua confiabilidade e flexibilidade, no entanto, apresenta elevado custo. Ele é utilizado em instalações de altas potências e para cargas com maior necessidade de continuidade no fornecimento de energia (FOLETTO, 2019).

Figura 2.23 – Arranjo barra dupla com disjuntor duplo.



Fonte: (MUZY, 2012)

Nas condições de operação, os circuitos podem estar ligados a uma barra ou a duas barras, e por isso esse arranjo possui alta confiabilidade. Para a manutenção de um disjuntor é preciso apenas abri-lo, sendo que a corrente continuará fluindo pelo outro ramo. Para a manutenção das barras retiram-se de operação todos os disjuntores e as chaves adjacentes ligados à barra sob manutenção (MUZY, 2012).

No caso de uma falha em circuito, ambos os disjuntores do circuito são abertos. Os defeitos na barra não tiram o nenhum circuito de operação, visto que a outra barra continuará alimentando cada circuito. Se o circuito estiver ligado apenas a uma barra, a barra em falta sai de operação (MUZY, 2012).

2.6.3.7 Barra dupla com disjuntor e meio

Na Figura 2.24 está ilustrado o arranjo de barra dupla com disjuntor e meio. As suas vantagens são maior flexibilidade e simplicidade de manobra; rápida recomposição; na ocorrência de falha nos disjuntores adjacentes às barras, são retiradas apenas um circuito de serviço; e uma das barras poderá ser retirada a qualquer momento em que ocorra a manutenção. As desvantagens dessa configuração são a necessidade do alto número de operações, do disjuntor intermediário e de circuitos agregados (FOLETTO, 2019).



Figura 2.24 – Arranjo barra dupla com disjuntor e meio.

Fonte: (MUZY, 2012)

A sua condição de operação é que cada par de circuitos está em uma seção de barra separada e, para cada dois circuitos, há três conjuntos de chaves adjacentes e disjuntor. Os equipamentos devem suportar a corrente de carga de duas saídas. No caso de apenas um TC por disjuntor, pode ocorrer a perda de um elemento a mais para alguma falha, descaracterizando a vantagem desse arranjo (MUZY, 2012).

Por via de regra, não há perda de circuito na manutenção de disjuntores, uma vez que há dois caminhos possíveis. Mas essa possibilidade é permitida devido a difícil visualização desse esquema, e os disjuntores não estão associados a um circuito somente. Na manutenção das barras, quando os disjuntores e seccionadores da barra são desligados, os circuitos passarão para a outra barra (MUZY, 2012).

Quando ocorre uma falta em um circuito, os demais circuitos não são afetados. No acontecimento de um defeito em uma barra, o caminho de energia por essa barra é perdido, mas a continuidade é garantida pelos disjuntores centrais (MUZY, 2012).

2.6.3.8 Anel simples

O esquema de anel simples está mostrado na Figura 2.25, e suas vantagens são o baixo custo; permite a remoção de disjuntor para manutenção, sem interrupção de carga; e requer apenas um disjuntor por circuito. Na ocorrência de uma falta durante a manutenção de um disjuntor, o anel é separado em duas seções e a proteção não atuará, e em caso de falta em um dos circuitos, causará uma falha no disjuntor e perda de um circuito adicional (FOLETTO, 2019).





Fonte: (MUZY, 2012)

Nesse arranjo cada circuito possui apenas um disjuntor e mais de um caminho possível. É utilizado em um número limitado de circuitos e os seus equipamentos devem suportar a corrente total da instalação. Quando há um defeito em um circuito, dois disjuntores adjacentes são perdidos, mas os outros circuitos continuam em operação. Defeitos nas barras também ocasionam a perda de dois disjuntores adjacentes, tirando o circuito ligado ao nó, porém os demais circuitos permanecem energizados (MUZY, 2012).

2.6.3.9 Anéis múltiplos

A configuração de subestação em anéis múltiplos está representada na Figura 2.26. A principal diferença em relação ao esquema de anel simples é sua maior variedade de operações para desenergizar o sistema, e a facilidade para a ampliação da subestação (FOLETTO, 2019).



Figura 2.26 – Esquema de anéis múltiplos.

Fonte: (MUZY, 2012)

As condições de operações são semelhantes ao arranjo anel simples, entretanto apresenta mais caminhos possíveis para a corrente, fazendo que esse esquema seja mais confiável para manutenção dos disjuntores. Na manutenção das barras, o circuito sai de operação, porque ela é realizada no nó do anel e a sua saída ligada, e seus disjuntores e chaves adjacentes são abertos. Sua visualização operacional apresenta maior complexidade (MUZY, 2012).

2.6.4 Equipamentos de uma subestação

As subestações elétricas constituem um ponto do Sistema Elétrico de Potência (SEP) onde a energia é transformada, controlada e distribuída (PAREDES, 2002). Nas subestações se encontram diversos equipamentos, dentre eles estão os transformadores, disjuntores, chaves seccionadoras e para-raios. Esses equipamentos são divididos de acordo com a sua finalidade no sistema elétrico: (AZEVEDO, 2015)

- Equipamentos de transformação:
 - Transformadores de potencial: São equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuir tensão de isolamento de acordo com a da rede a qual estão ligados (FILHO, 2005).

- Transformadores de corrente: São equipamentos que permitem aos instrumentos de medição e proteção funcionarem adequadamente sem que seja necessário possuírem correntes nominais de acordo com a corrente de carga do circuito ao qual estão ligados (FILHO, 2005).
- Transformadores de força: São equipamentos que elevam ou reduzirem a tensão de acordo com a necessidade. Às vezes, é necessário elevar a tensão para fins de transmissão, ou então, reduzi-la para realizar a distribuição e permitir o suprimento de cargas menores (PAREDES, 2002).

• Equipamentos de proteção:

 Para-raios: São utilizados para proteção dos sistemas elétricos e equipamentos da subestação contra surtos de tensão, que podem se originar durante manobras de chaves seccionadoras e disjuntores, ou devido às descargas atmosféricas. Os para-raios limitam as sobretensões a um valor máximo (FILHO, 2005).

• Equipamentos de manobra:

- Disjuntores: Têm a função de proteção e manobra. Os disjuntores têm o objetivo de interromper as correntes de defeito em um circuito durante o menor espaço de tempo. São utilizados como dispositivos de manobra, pois interrompem correntes de circuitos operando a plena carga e em vazio, e energizam os circuitos em condições de operação normal ou em falta (FILHO, 2005).
- Seccionadoras: São equipamentos que realizam manobras de abertura ou fechamento de determinados trechos do circuito elétrico sem carga, fazendo com que sejam mantidas as distâncias de isolamento adequadas (PAREDES, 2002).

2.6.5 Especificação dos equipamentos

Para obter a especificação das características elétricas dos equipamentos instalados em uma subestação, é necessário realizar o estudo de fluxo de potência, para determinação das correntes nominais, o estudo de curto-circuito, para determinação da suportabilidade às situações de falta e interrupção dos disjuntores, e o estudo de sobretensões, para determinar os níveis de isolamento (D'AJUZ, 1985).

Nas subestações, operando em condições normais, são aplicadas correntes e tensões que operam de acordo com os valores nominais dos equipamentos. Porém, o sistema elétrico está sujeito a situações de anormalidade, tais como curtos-circuitos e sobretensões. As situações mais comuns são: (COSTA, 2015)

- Sobrecorrentes de curta duração causadas por curtos-circuitos (< 3 s);
- Sobrecorrentes de longa duração, causadas por sobrecargas de dezenas de segundos até alguns minutos;
- Sobretensões de longa duração (segundos ou dezenas de segundos), causadas por

distúrbios no sistema;

 Sobretensões de curtíssima duração (μs), como as ondas de impulso, que ocorrem devido descargas atmosféricas na rede, e os chamados impulsos de manobra que surgem devido à abertura e ao fechamento sob tensão dos disjuntores e seccionadores.

Em consequência dessas anormalidades, podem ocorrer falhas na instalação de origem elétrica ou mecânica. Estes eventos são previsíveis e, para lidar com eles, é necessário planejamento e capacitação técnica (COSTA, 2015).

Neste trabalho, serão tratados os estudos de curto-circuito nos equipamentos de uma subestação. Durante a ocorrência de um curto-circuito, os equipamentos devem suportar as solicitações de corrente até o instante em que os disjuntores atuem isolando o sistema, sem que haja prejuízos em seu desempenho. Os disjuntores devem também suportar as correntes que surgirem quando, em manobras de fechamento, estabelecerem o curto-circuito (D'AJUZ, 1985).

Para especificação das correntes de curto-circuito de disjuntores, chaves seccionadoras e transformadores de corrente, pode-se seguir os seguintes passos: (D'AJUZ, 1985)

- Determinar as correntes através dos equipamentos para configurações futuras, cerca de 30 anos, adequar aos valores das normas vigentes e adotar, se possível, a padronização;
- Determinar a relação X/R da rede e a constante de tempo da componente contínua da corrente de curto-circuito;
- Determinar o valor de pico máximo da corrente de curto-circuito assimétrica, valor que define a capacidade de estabelecimento em curto-circuito para os disjuntores;
- Determinar o valor da componente contínua, para os disjuntores, no momento da separação dos contatos do disjuntor.

As correntes de curto-circuito podem causar danos aos componentes de uma subestação, e além disso, geram solicitações de natureza mecânica, atuando, principalmente, sobre os barramentos, chaves e condutores, causando o rompimento e deformações nos equipamentos (FILHO, 2017).

2.7 Superação de equipamentos

A crescente expansão do Sistema Elétrico Nacional (SIN), devido ao aumento da potência instalada e da rede de transmissão, eleva os níveis de curto-circuito e da corrente de fluxo da rede, e por isso o processo de análise de superação de equipamentos deve estar em constante evolução (ONS, 2014).

Se as correntes de curto-circuito apresentarem níveis superiores aos valores nominais e de operação dos equipamentos por onde circulam, a vida útil dos equipamentos pode ser reduzida. Muitos dos equipamentos instalados no sistema elétrico brasileiro estão no limiar de superação, devido à expansão da rede (FERREIRA, 2007).

Os equipamentos elétricos de uma subestação devem permanecer por um longo período de tempo, a fim de que os custos de aquisição e instalação sejam compensados. Para isso, é de fundamental importância o estudo do planejamento do sistema que forneça as informações necessárias para definição das características nominais dos equipamentos (D'AJUZ, 1985).

No entanto, com o equipamento em operação é possível que ocorram mudanças na configuração, por isso, verificações periódicas comparando as correntes de carga, corrente de curto-circuito e tensão de reestabelecimento transitória com as características nominais dos equipamentos são indispensáveis (D'AJUZ, 1985).

No estudo de superação dos equipamentos consideram-se as seguintes grandezas, ao longo da rede, que devem ser monitoradas e comparadas à suportabilidade nominal dos equipamentos analisados: (ONS, 2014)

- Corrente de Carga;
- Corrente de Curto-Circuito (Simétrica e Assimétrica);
- Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT), somente para disjuntores.

Neste trabalho, será feita a análise das correntes de curto-circuito simétricas para a identificação da superação dos disjuntores.

2.7.1 Disjuntores

Os disjuntores devem ser dimensionados para suportarem as ampliações que ocorrerem no sistema durante o período de tempo em que ficam em operação (D'AJUZ, 1985). A superação dos disjuntores pode ser avaliada por corrente de carga, por Tensão de Restabelecimento Transitória (TRT) e por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica (JUNIOR; DUARTE, 2010). Neste trabalho será abordada apenas a superação por corrente de curto-circuito simétrica.

Através dos dados históricos das empresas de energia, é possível obter a porcentagem da ocorrência de curto-circuito no sistema elétrico. Nas subestações, a ocorrência de curto-circuito é de 5 %. Nos sistemas elétricos, sua ocorrência pode ser catalogada dada a natureza da falta, conforme mostra a Tabela 2.1 (JUNIOR; DUARTE, 2010).

Tipos de curtos-circuitos	Ocorrências em $\%$	
Trifásico	6	
Bifásico	15	
Bifásico à Terra	16	
Monofásico à Terra	63	

Tabela 2.1 – Ocorrências dos curtos-circuitos.

A corrente de curto-circuito é dividida em componente alternada e contínua, e a soma delas pode trazer uma assimetria da corrente de curto-circuito em relação ao eixo do tempo (JUNIOR; DUARTE, 2010).

Figura 2.27 – Corrente de curto-circuito



Fonte: (JUNIOR; DUARTE, 2010)

Onde:

- $I_{CA(pico)}$: valor de crista da componente CA da corrente de falta;
- I_{CC0} : valor inicial da componente CC da corrente de falta.
- Para a condição de máxima assimetria admitida: $I_{CC0} = I_{CA}$.

A variação de assimetria de corrente é característica da relação X/R do sistema. Ela pode influenciar diretamente na capacidade de interrupção de curto-circuito de um equipamento (FERREIRA, 2007). Quanto maior for X/R, maior é a assimetria e o tempo para o decaimento da corrente. O grau de assimetria depende do tipo de curto-circuito, do local e do momento de sua ocorrência, sendo máxima se a tensão no início do curto for nula (JUNIOR; DUARTE, 2010).

A amplitude da componente periódica CA decai exponencialmente com o tempo, porque há influências das reatâncias transitórias, subtransitórias e síncronas dos geradores e das tensões que afetam essas impedâncias (JUNIOR; DUARTE, 2010).

Se a relação X/R rede ultrapassar o X/R especificado para o disjuntor não significa que, obrigatoriamente, esse equipamento será superado. A superação por X/R é determinada pela análise deste parâmetro simultaneamente com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica, ambos determinados pelo cálculo de curto-circuito da rede (ONS, 2014).

2.7.1.1 Superação por corrente de curto-circuito simétrica

Na análise de superação por corrente de curto-circuito simétrica, compara-se a corrente de curto-circuito simétrica total com a capacidade de corrente nominal que o disjuntor suporta (ONS, 2014).

A corrente de curto-circuito simétrica nominal do disjuntor é especificada por um valor capaz de suportar o aquecimento dos contatos por Efeito Joule e de extinguir o arco elétrico, o que define a característica térmica do disjuntor (JUNIOR; DUARTE, 2010).

No caso das correntes de curto-circuito simétricas, devem ser avaliados os níveis das correntes monofásicas e trifásicas. No final, para análise de superação de disjuntores, deve ser considerada a condição mais severa de curto-circuito nas situações demonstradas a seguir (FERREIRA, 2006).

I. Curto-circuito na barra

Quando ocorre um curto-circuito na barra, a corrente que passa pelo disjuntor é a corrente de contribuição do circuito no qual ele está conectado, como mostrado na Figura 2.28.





Fonte: (JUNIOR; DUARTE, 2010)

$$I_{DJ1} = I_{f1} (2.35)$$

$$I_{CURTO} = I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} + I_{f4}$$
(2.36)

II. Curto-circuito na linha

No caso de curto-circuito na linha, a corrente que circula no disjuntor é a corrente máxima de curto-circuito na subestação menos a corrente de falta na linha do disjuntor em análise, como exposto na Figura 2.29.



Figura 2.29 – Corrente de curto-circuito na linha.

Fonte: (JUNIOR; DUARTE, 2010)

$$I_{CURTO} = I_{f1} + I_{f2} + I_{f3} + I_{f4}$$
(2.37)

$$I_{DJ1} = I_{CURTO} - I_{f1} = I_{f2} + I_{f3} + I_{f4}$$
(2.38)

$$I_{DJ1} = I_{f2} + I_{f3} + I_{f4} \tag{2.39}$$

III. Curto-circuito de *line-out*

Na condição de *line-out*, a falta é aplicada na saída de uma linha que está com a extremidade oposta aberta. Nesse caso, o disjuntor deve interromper toda a corrente de curto-circuito, sendo que, na maioria dos casos, essa é a condição mais severa de falta. A Figura 2.30 representa essa condição.

Figura 2.30 – Corrente de curto-circuito em condição de line-out.



Fonte: (JUNIOR; DUARTE, 2010)

$$I_{CURTO} = I'_{f2} + I'_{f3} + I'_{f4}$$
(2.40)

$$I_{DJ1} = I_{CURTO} \tag{2.41}$$

2.7.1.2 Superação por corrente de curto-circuito assimétrica

Na análise de superação por corrente assimétrica de curto-circuito, deve-se levar em conta a relação X/R do sistema (FERREIRA, 2006). O valor do pico máximo da corrente de curto-circuito assimétrica é responsável pelas características dinâmicas dos equipamentos da rede (JUNIOR; DUARTE, 2010).

A Equação (2.42) representa a corrente assimétrica de curto-circuito (RABITO; PALOMA; SILVESTRI, 2011).

$$i(t) = I_M * \left(\sin\left(wt + \delta\right) - \sin\left(\delta\right) * e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$$
(2.42)

Onde:

- i(t): corrente assimétrica de curto-circuito;
- I_M : valor de crista da corrente simétrica de curto-circuito;
- w: frequência industrial da rede;
- τ : constante de tempo da rede;
- δ : diferença entre o ângulo de fase da tensão e o ângulo da impedância de curtocircuito da rede;
- t: intervalo de tempo após o curto-circuito;
- $I_M * \sin(wt + \delta)$: componente simétrica ou resposta forçada;
- $I_M * \sin(\delta) * e^{-t/\tau}$: componente de corrente contínua ou resposta natural.

Sendo:

$$I_M = \frac{V_M}{\sqrt{R^2 + w^2 * X^2}}$$
(2.43)

$$w = 2 * \pi * f$$
 (2.44)

$$\tau = \frac{X}{R} \tag{2.45}$$

A resistência e a reatância da constante τ referem-se aos equivalentes de Thévenin vistos desde a fonte geradora até o ponto de defeito partir da ocorrência da falta (JUNIOR; DUARTE, 2010). O amortecimento da componente contínua da corrente de curto-circuito ocorre de forma exponencialmente inversa, e a constante de tempo τ tem valor igual a 45, 60, 75 e 120 ms, com frequência de 60 Hz. Esse tipo de superação ocorre no segundo estágio do sistema de interrupção de corrente (RABITO; PALOMA; SILVESTRI, 2011).



Figura 2.31 – Decaimento da componente CC para diferentes τ , a partir do início da falta.

Fonte: (FERREIRA, 2006)

Na Figura 2.31, é mostrada a curva de decaimento exponencial da componente contínua da corrente de curto-circuito em função do tempo. Nessa figura, observa-se a influência de X/R na composição da corrente de curto-circuito ao longo do tempo, sendo que quanto maior a relação X/R, mais lento é o decaimento da corrente (FERREIRA, 2006).

Com o aumento da instalação de geradores de energia próximas aos centros de carga, as amplitudes das correntes de curto-circuito podem alcançar valores próximos à capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores. A relação X/R também está aumentando, o que leva a superação por correntes de curto-circuito assimétricas (FERREIRA, 2006).

A análise simplificada por superação de disjuntores por curtos-circuitos simétricos e assimétricos pode ser feita pelos critérios da Tabela 2.2 (JUNIOR; DUARTE, 2010).

Critério	Assimetria	Simetria
1	X/R < 16,96	$I_{CC} > 90\% I_{CN}$
2	16,96 < X/R < 22,62	$I_{CC} > 85\% \ I_{CN}$
3	22,62 < X/R < 28,28	$I_{CC} > 80\% \ I_{CN}$
4	28,28 < X/R < 45,24	$I_{CC} > 70\% \ I_{CN}$
5	X/R > 45,24	

Tabela 2.2 – Critérios de simetria e assimetria para a análise da superação por corrente de curto-circuito.

Fonte: (JUNIOR; DUARTE, 2010)

Onde:

- *I_{CC}*: corrente de curto-circuito simétrica calculada através de um programa de análise de curto-circuito;
- I_{CN} : corrente nominal de curto-circuito suportada pelo disjuntor.

Se algum critério for atingido, o disjuntor fica em estado de alerta, podendo estar superado. Quando há superação dos disjuntores por corrente de curto-circuito, as alternativas adotadas são alterações na topologia da rede, modificação dos equipamentos presentes na subestação e utilização de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito (ONS, 2014), e outras medidas que serão vistas na Subseção 2.7.2.

2.7.2 Métodos para evitar superação de equipamentos por corrente de curto-circuito

Para garantia da confiabilidade e da segurança da rede, algumas medidas podem ser aplicadas no caso da ocorrência da superação de equipamentos por corrente de curtocircuito: (D'AJUZ, 1985) (FERREIRA, 2006)

- Substituição do equipamento superado por outro de maior capacidade;
- Seccionamento de barras: seu objetivo é aumentar as impedâncias de sequência positiva, negativa e zero, reduzindo assim os níveis de curto-circuito monofásico e trifásico;
- Chaveamento sequencial: a abertura sequencial de disjuntores, de forma que o disjuntor com sua capacidade superada só atue após a abertura de outro disjuntor, evitando a operação de disjuntores para curto-circuitos superiores a sua capacidade nominal;
- *By-pass* de linhas nas SEs: ao *by-passar* um ou mais pares de circuitos, o nível de curto-circuito no barramento é reduzido;
- Desligamento de geradores: evita a contribuição desses geradores para o curto-circuito;
- Modificação da rede de sequência zero: utilizada em situações onde o curto-circuito monofásico é maior que o trifásico;

- Interligação de redes através de sistema de corrente contínua: nesse caso não há contribuição da corrente de curto-circuito de um sistema para outro.
- Utilização de Dispositivos Limitadores de Curto-Circuito (DLCs): eles limitam as correntes de curto-circuito quando seus valores máximos são superiores às características nominais das instalações existentes. Utilizados quando a substituição de todos os equipamentos superados não for possível ou seja inviável.

Para encontrar a solução mais adequada, é necessária uma investigação detalhada da viabilidade técnica, econômica e das questões operativas da rede, uma vez que para substituição dos equipamentos superados, é preciso desligar determinados pontos da rede, o que pode ser problemático ou inviável (ONS, 2014).

3 ANÁLISE DA SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES

3.1 Introdução

As diretrizes básicas da proteção de sistemas elétricos, com relação aos estudos de curto-circuito, no sistema de transmissão para o planejamento e operação do Sistema Interligado Nacional são estabelecidas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2009).

Para isso, o ONS disponibiliza uma base de dados de curto-circuito dos componentes de operação do SIN e cria casos de referência, para subsidiar os cálculos de curto-circuito necessários para os estudos de ajustes, coordenação da proteção, verificação da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores, avaliação da suportabilidade dos componentes do sistema e demais informações necessárias aos estudos elétricos em geral e auxiliar nas análises de perturbações (ONS, 2019a).

As concessionárias devem conceder para o ONS informações sobre as alterações ocorridas nos sistemas, como substituição e entrada de novos equipamentos, alterações de configurações e a capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores de suas instalações (ONS, 2019a).

Os dados utilizados como referência para os estudos de cálculo de curto-circuito e para análise da superação de disjuntores nesse trabalho são obtidos no Plano de Ampliações e Reforços da Rede Básica, período 2019 a 2023.

Nesse plano, o ONS efetuou o levantamento dos níveis de curto-circuito em todos os barramentos da Rede Básica, Rede Básica de Fronteira e Demais Instalações da Transmissora, e forneceu as seguintes informações ao setor elétrico (ONS, 2019a):

- Níveis de curto-circuito monofásico, trifásico e bifásico-terra verificados em junho de 2018, e os esperados para os horizontes dez/2019, dez/2020, dez/2021, dez/2022 e dez/2023, nas barras do SIN selecionadas, devido à inclusão das diversas obras previstas até o horizonte de dez/2023;
- Relação X/R das diversas barras do SIN e sua variação, considerando as obras propostas até o horizonte de dez/2023;
- Fornecer estudos de acesso e pré-operacionais à Rede Básica dos diversos agentes, com a apresentação das potências de curto-circuito em diversas barras do SIN;
- Apresentar um diagnóstico das barras do SIN com possíveis problemas de superação da capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores, visando caracterizar a necessidade de estudos mais detalhados dos equipamentos vinculados a essas barras mantendo-se, assim, a confiabilidade do SIN;
- Subsidiar os estudos de curto-circuito dos diversos agentes conectados à Rede Básica.

3.2 Análise da superação de disjuntores

Os resultados dos relatórios de superação de disjuntores, apresentados no Plano de Ampliações e Reforços da Rede Básica do ONS, são obtidos a partir das simulações realizadas no ANAFAS. Por isso, é necessário entender quais são os critérios adotados pelo ONS e pelo programa ANAFAS.

3.2.1 ONS

Nessa subseção, as referências utilizadas são os Estudos de curto-circuito referentes ao período 2018-2023 (ONS, 2019a), e os Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão (ONS, 2014), publicados pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico.

O ONS considera a rede simulada com a sua configuração completa, com todos seus componentes operando. Para primeira verificação, a capacidade de interrupção da instalação é aquela referente ao disjuntor com menor valor de corrente conectado à barra em estudo.

No estudo superação, os disjuntores superados são identificados pela capacidade de interrupção simétrica de corrente de curto-circuito (ICCS). Os procedimentos de superação de disjuntores por corrente de curto-circuito simétrica, por TRT e por Constante de Tempo (X/R), estão mostrados no fluxograma da Figura 3.1.



Figura 3.1 – Procedimento para avaliação da superação de disjuntores.

Fonte: (ONS, 2014)

Para análise de superação do disjuntor por corrente de curto-circuito simétrica, é efetuada a relação entre a corrente de curto-circuito e a capacidade de interrupção simétrica do disjuntor, o disjuntor é classificado da seguinte maneira:

- SUPERADO: Se a relação apresentar valores iguais ou superiores a 100%;
- EM ALERTA: Se a relação apresentar valores iguais ou superiores a 90% e inferiores a 100%;
- OK: Se a relação estiver abaixo de 90%.

De acordo com o procedimento da Figura 3.1, se a corrente de curto-circuito no disjuntor (*Icc*) for maior que 85% em relação à corrente de curto-circuito nominal (*Icc* nom), é necessário investigar o TRT e, se essa relação for superior a 70% da *Icc nom*, é preciso avaliar o X/R.

Por isso, nos estudos de superação, é conveniente que a corrente de curto-circuito no disjuntor seja menor que 70% da corrente de curto-circuito nominal, para que não haja a necessidade de realizar os estudos mais detalhados por parte do agente de transmissão. O ONS realiza simulações de capacidade de interrupção simétrica dos disjuntores, variação dos níveis de curto-circuito e relação X/R. No estudo realizado em 2018, foram supervisionadas 997 barras com tensão igual ou superior a 230 kV, pertencentes à rede básica, e 4990 barras com tensão inferior a 230 kV.

É fornecido também um estudo detalhado das correntes de contribuição pelos disjuntores dos barramentos classificados por empresa, para facilitar a identificação dos equipamentos quanto à violação de limites de capacidade de interrupção simétrica, apresentando as contribuições pelos diversos disjuntores dos barramentos que apresentaram níveis de curto-circuito na barra igual ou superior a 100%, considerando as configurações entre junho de 2018 até dezembro de 2023.

Em algumas instalações são tomadas medidas para a redução dos níveis de curtocircuito, como esquemas de abertura sequencial, abertura de barramentos e/ou retirada de geração, para que os limites de suportabilidade não sejam ultrapassados. Entretanto, o ONS entende que essas ações impõem restrições limitadoras à operação do SIN.

3.2.2 ANAFAS

As informações contidas nessa subseção estão no Manual do Usuário do ANAFAS - Versão 7.2.0, publicado em 2017 (ANAFAS, 2017).

O estudo de superação de disjuntores realizado pelo ANAFAS permite detectar disjuntores com problemas de superação. O programa avalia a superação de disjuntores por corrente simétrica de curto-circuito em cada terminal de equipamento, seguindo os critérios e padrões definidos no relatório do ONS, Estudos de Curto-Circuito - Período 2004-2007.

No ANAFAS, o estudo é dividido em duas etapas. Na primeira, compara o nível de curto-circuito total de cada barra com seu disjuntor de menor capacidade de interrupção de corrente simétrica, verificando as possíveis barras com problemas de superação. Na segunda etapa, executa simulações de forma a encontrar o maior valor de corrente que pode circular por cada terminal de circuito das barras suspeitas.

Os dados de capacidade de interrupção de corrente simétrica são fornecidos no arquivo .*ANA*. Caso não se disponha de todos esses dados, a capacidade de interrupção da barra será considerada igual à menor capacidade da barra.

O conjunto de barras em que será realizado o estudo é definido pelo usuário. É importante que nas barras analisadas a base de tensão seja especificada, porque são feitas comparações em kA e as barras com base de tensão inválida serão ignoradas.

Na primeira etapa são simuladas as faltas trifásica, monofásica e bifásica-terra nas barras definidas pelo usuário, e seus níveis de curto totais são comparados com seu disjuntor de menor capacidade. No caso do curto bifásico-terra, é considerado o maior nível de curto entre as fases B e C.

Quando o nível de curto total da barra for inferior à capacidade de interrupção do

menor disjuntor, é descartada a possibilidade de haver superação. Quando o nível de curto total for próximo ou superior à menor capacidade de interrupção, pode haver problemas de superação, e então é realizada a segunda etapa de estudo para verificar se há superação de disjuntores.

As barras são separadas em subconjuntos de acordo com seu nível de superação e relação X/R, conforme os critérios da tabela abaixo:

Subconjunto	Maior $\frac{X}{R}$	$\begin{array}{c} \text{Maior} \ \frac{\text{N}\text{ível de curto}}{\text{Capacidade de interrupção}} \ (\%) \end{array}$
(a)	Menor que 16,96	> 90%
(b)	Entre 16,96 e 22,62	> 85%
(c)	Entre 22,62 e 28,28	> 80%
(d)	Entre 28,28 e 45,24	> 70%
(e)	Maior que $45,24$	Qualquer
(f)	Qualquer	Entre 90% e 100%
(g)	Qualquer	> 100%
(h)	Qualquer	> "X"%

ſabela 3.1 – Relação Σ	/R e nível de superação enti	e 1F, 3F e 2FT.
------------------------	------------------------------	-----------------

Fonte: (ANAFAS, 2017)

De acordo com os critérios de classificação do ONS, as barras dos subconjuntos de (a) a (e) estão OK, as barras do subconjunto (f) estão em estado de alerta, independente da relação X/R, e as barras do subconjunto (g) estão superadas. As barras do subconjunto (h) serão analisadas na segunda etapa do estudo, sendo "X" o valor padrão de 100%, mas o usuário pode alterá-lo.

As barras do subconjunto (h) podem apresentar problemas de superação de seus disjuntores, e por isso são realizadas as análises de contribuição dos circuitos destas barras. Para cada barra são simuladas as três condições de falta expostas na subseção 2.7.1.1. São executadas essas condições para os curtos monofásico, trifásico e bifásico-terra, totalizando nove simulações por circuito ligado à barra.

Cada barra tem todos seus circuitos analisados, com o intuito de verificar a contribuição mais severa, entre as três condições, para o curto monofásico, trifásico e bifásico-terra, sendo que a condição de *line-out* geralmente apresenta-se como o caso mais severo. Nas faltas monofásica e trifásica, é observada a fase A; na falta bifásica-terra, é considerado o maior valor entre as fases B e C.

O ANAFAS calcula da seguinte maneira as três condições de falta:

- Curto-circuito na barra: a corrente no disjuntor é a corrente de contribuição do circuito, calculada diretamente pelo programa;
- Curto-circuito na linha: a corrente no disjuntor é a corrente de curto-circuito da barra menos a corrente de contribuição do circuito;
- Curto-circuito de *line-out*: utiliza-se a mesma análise do item anterior, porém, como o circuito está aberto, a corrente de contribuição igual a zero, e portanto, a corrente

no disjuntor é igual a corrente de curto na barra.

Por fim, o programa compara o maior valor de corrente de contribuição de cada terminal de circuito com a capacidade de interrupção de corrente simétrica do disjuntor, indicando se o disjuntor está OK, SUPERADO ou em ALERTA, conforme os critérios descritos na subseção 3.2.1.

A série R10 da norma IEC60059 - Standard Current Ratings apresenta valores normalizados tanto para corrente nominal de regime contínuo quanto para capacidade de interrupção nominal de curto circuito. Essa série compreende os números 1 - 1.25 - 1.6 - 2 - 2.5 - 3.15 - 4 - 5 - 6.3 - 8 e seus produtos por 10^n . Portanto, as ICCS normalizadas dos disjuntores são 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63 e 80 kA.

3.3 Considerações finais do capítulo

Para análise de superação de disjuntores, leva-se em consideração a base de dados do ONS, e através do Plano de Ampliações e Reforços, é possível obter os dados de curto-circuito monofásico, trifásico e bifásico-terra. Para análise de superação, é feita a relação entre a corrente de curto-circuito e a capacidade de interrupção simétrica do disjuntor, para classificá-lo como *Superado*, *Alerta* ou *OK*.

É importante salientar que o objetivo dos resultados da análise de superação, na Subseção 6.3.3, é que a corrente de curto-circuito no disjuntor seja inferior a 70% da sua corrente de curto-circuito nominal, a fim de se evitar a análise de estudos envolvendo TRT ou X/R, que não são o enfoque desse trabalho. No casos casos em que o disjuntor esteja em *Alerta* ou *Superado*, é aconselhável a substituição do mesmo.

O ANAFAS, em sua análise de superação, primeiramente separa as barras dos circuitos em subconjuntos de acordo com seu nível de superação e relação X/R. Na segunda etapa do estudo, o programa avalia as três condição de falta (na barra, na linha e de *line-out*) para cada tipo de curto-circuito. Nas faltas monofásica e trifásica observa-se a fase A, e na falta bifásica-terra é considerado o maior valor entre as fases B e C. Geralmente, a condição de falta mais severa é a de *line-out*. Por fim, o ANAFAS classifica a situação dos disjuntores de acordo com os critérios estabelecidos pelo ONS.

Considerando-se uma subestação com barramento duplo e interligador, o ANAFAS não realiza o cálculo de curto-circuito no interligador, pois eles analisam o sistema na modelagem barra-ramo da rede. Em seus relatórios, o ONS assume que a corrente de falta nos interligadores é a pior condição de corrente de curto-circuito presente na SE, considerando a análise de superação de seus disjuntores adjacentes. Por isso, uma das motivações dos estudos deste trabalho consiste em empregar a modelagem no nível de seção de barras, a fim de calcular o valor real da corrente de curto que passa nos interligadores e verificar a validade da aproximação que o ONS realiza.
4 FERRAMENTAS E MÉTODOS

Neste capítulo, será apresentada a metodologia empregada para a elaboração deste trabalho de conclusão de curso, além da descrição das ferramentas computacionais utilizadas durante o desenvolvimento do mesmo — o ANAFAS e o Python —, ambas necessárias na formulação do método proposto, sendo o cálculo do curto-circuito em dois estágios para redes modeladas no nível de SE, e também para as simulações realizadas, para posterior análise dos resultados obtidos.

4.1 Metodologia

A figura abaixo apresenta o fluxograma geral que descreve as rotinas empregadas pelo método proposto no presente trabalho, de modo a se retornar as correntes de falta incidentes nas subestações elétricas a partir de sua aplicação.





Fonte: Elaborado pelos autores.

Conforme apresentado no fluxograma acima, o método estrutura-se em uma sequência de dois estágios para a determinação das correntes de curto-circuito nos ramos e dispositivos chaveáveis das subestações. A metodologia apresentada neste trabalho trata de uma extensão dos estudos sobre modelagem no nível de seção de barras para o problema de fluxo de potência, apresentados em (ROSAS; LOURENCO; FERNANDES, 2012) e (FOLETTO, 2019), porém agora aplicados ao problema do cálculo de curto-circuito.

O primeiro estágio envolve a representação da rede sob a modelagem convencional no nível barra-ramo do sistema elétrico, envolvendo também o método clássico para o cálculo de curto-circuito a partir das componentes simétricas, conforme apresentado na Seção 2.3, que deverá ser executado pelo programa computacional ANAFAS. Para o segundo estágio do método proposto, é empregada a modelagem no nível de seção de barras para as SEs da rede elétrica. Desta forma, em posse dos dados coletados no primeiro estágio, estes são processados numa rotina de operações lineares envolvendo a Teoria de Grafos e a solução de sistemas pelo método de Gauss, desenvolvidas no ambiente de programação do Python, de modo a se determinar as correntes em seus ramos e dispositivos chaveáveis.

A análise da superação de dispositivos chaveáveis das subestações elétricas, realizada partindo-se dos resultados obtidos pelo método proposto de curto-circuito no nível de subestações, foi fundamentada pelas orientações apresentadas pelo ONS, no documento intitulado "Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão" (ONS, 2014), assim como também consultando as dissertações em (JUNIOR; DUARTE, 2010) e (FERREIRA, 2006), conforme retratado no Seção 2.7.

4.2 Ferramentas computacionais

Os programas utilizados no desenvolvimento deste trabalho estão abaixo listados, com suas respectivas informações sobre versão e desenvolvedores:

- ANAFAS Análise de Faltas Simultâneas
 - Versão: 7.2.7 (2019) Acadêmica (limitada a redes de até 120 barras)
 - Desenvolvedor: Departamento de Redes Elétricas (DRE) CEPEL
- Python
 - Versão: 3.7.5 (2019)
 - Desenvolvedor: Python Software Foundation
- GNU Octave
 - Versão: 5.1.0. (2019)
 - Desenvolvedor: John W. Eaton e outros

4.2.1 ANAFAS

O ANAFAS (Análise de Faltas Simultâneas) é um programa computacional desenvolvido pelo DRE (Departamento de Redes Elétricas) do CEPEL, e é utilizado para cálculos de curtos-circuitos na rede elétrica, permitindo a execução automática de grande número de faltas. No ANAFAS, é possível realizar o estudo de situações de falta para os curto-circuitos: trifásico, fase-terra, fase-fase ou fase-fase-terra; obter os equivalentes de rede, reduzir o nível de curto em uma barra e calcular automaticamente a evolução dos níveis de curto, permitindo a geração de resultados orientados a pontos de falta ou de monitoração. O programa permite ao usuário um ambiente gráfico para construção de diagramas unifilares do sistema elétrico; ou recebe as informações do sistema realizando a leitura de um arquivo de dados da rede, no padrão de dados do CEPEL. O ANAFAS possibilita a análise de curto-circuito incidentes nas barras do sistema, ou em pontos intermediários nas LTs, e utiliza o algoritmo de solução baseando-se no método da redução do ponto de falta para as sequências das componentes simétricas (CEPEL, 2019). Os resultados podem ser exportados como um arquivo de dados em forma de tabela.

Nota: Por simplificação e aproximação, o ANAFAS atribui às impedâncias de sequência negativa os mesmos valores da impedância de sequência positiva.

4.2.2 Python

O Python é uma linguagem de programação de alto nível administrada pela Python Software Foundation. O programa é uma ferramenta do tipo *open source*, ou seja, o seu código-fonte e documentação estão disponíveis gratuitamente ao público para download e utilização. Dentre as aplicações do Python, estão o desenvolvimento Web e Internet, utilização em computação científica e numérica para análise e modelagem de dados, e para o desenvolvimento de *softwares* (FOUNDATION, 2019).

A escolha dessa linguagem de programação foi devido a facilidade de utilização, simplicidade da sua lógica de programação, por se tratar de uma linguagem de alto nível, e eficácia na utilização no problema abordado. O Python é uma linguagem multiplataforma, ou seja, roda em diferentes plataformas, pois basta ter um interpretador para processar o código-fonte em qualquer sistema ou processador (RAMOS, 2018).

4.2.3 GNU Octave

O GNU Octave trata-se de uma linguagem de programação em alto nível, sendo uma ferramenta que possibilita o trabalho nos âmbitos do cálculo numérico, tais como problemas envolvendo sistemas lineares e não-lineares; estudos estatísticos; soluções de álgebra linear; operações envolvendo matrizes e vetores; plotagem de gráficos; e análise de experimentos com dados numéricos. O programa é uma ferramenta do tipo *open source*, ou seja, o seu código-fonte e documentação estão disponíveis gratuitamente ao público para download e utilização (OCTAVE, 2019).

5 DESCRIÇÃO DO MÉTODO

5.1 Introdução

O método em dois estágios consiste em uma ferramenta de análise computacional capaz de determinar as correntes de curto-circuito no nível de subestação. Conforme já enunciado na Seção 4.1, e como o próprio nome sugere, o método é composto por dois estágios distintos mas dependentes entre si, de modo que o segundo estágio determina as correntes incidentes sobre os ramos internos da subestação a partir das correntes de curto-circuito fornecidas pelo primeiro estágio, cujas correntes são calculadas pelo ANAFAS sob a abordagem barra-ramo da rede. Desta forma, este capítulo tem por objetivo descrever o algoritmo de solução desenvolvido pelos autores no segundo estágio do método, que para este trabalho de conclusão, foi implementado através da linguagem de programação do Python. Contudo, para facilitar a ampla compreensão, o algoritmo será descrito através de um pseudo-código, de modo a permitir o seu entendimento àqueles que estiverem habituados a qualquer outra linguagem de programação.

Ainda assim, o programa desenvolvido poderá ser acessado a partir do repositório para consulta pública em: ">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini/Dois_CoC>">https://github.com/leonardo-alfini

5.2 Formulação do problema

Para se realizar a representação matemática de uma subestação elétrica, a fim de se possibilitar sua leitura em um algoritmo computacional, faz-se uso da Teoria de Grafos, conforme apresentado na Seção 2.4. Nesse sentido, uma subestação elétrica passa a ser tratada como um grafo, de modo que seus nós ou barramentos internos referem-se aos vértices do conjunto, à medida que seus ramos chaveáveis referem-se às arestas do mesmo. Uma vez que deseja-se obter os fasores das correntes sobre os ramos chaveáveis da subestação, assume-se que as arestas do grafo deverão possuir um sentido, ou seja, uma SE trata-se de um grafo orientado. A representação matemática do grafo, que vai relacionar os nós aos ramos da subestação, será realizada a partir da matriz de incidência A, cuja formação deverá ser feita a partir das seguintes orientações.

- $A_{ij} = 0$, se o ramo chaveável j não estiver conectado ao nó i;
- $A_{ij} = -1$, se o ramo chaveável *j* estiver conectado ao nó *i*, com sua corrente orientada no sentido de estar saindo deste nó;
- $A_{ij} = +1$, se o ramo chaveável *j* estiver conectado ao nó *i*, com sua corrente orientada no sentido de estar entrando neste nó.

Observação: Note que a convenção adotada aqui para formação da matriz de incidência, conforme apresentada acima, é inversa àquela apresentada na Seção 2.4, considerando o sinal para uma aresta entrando e saindo de um vértice. A ideia se mantém a mesma e não afeta a representação do grafo, uma vez que trata-se apenas da convenção adotada para os sentidos das correntes.

Sendo as variáveis do sistema as correntes sobre os disjuntores da subestação, que estão sobre os ramos chaveáveis da mesma, pode-se assumir que os elementos da matriz de incidência A tratam-se dos coeficientes associados a cada elemento do vetor de incógnitas \overline{x} . E ainda, sobre cada nó haverá uma injeção de corrente associada, definindo o termo independente pelo vetor \overline{b} , proveniente do primeiro estágio do método. Assim, o sistema pode ser descrito pela seguinte forma:

$$A * \overline{x} = \overline{b} \tag{5.1}$$

Onde:

- $A \rightarrow \text{Matriz}$ de incidência $(n \ge m)$;
- $\overline{x} \rightarrow$ Vetor de correntes sobre os ramos chaveáveis $(m \ge 1)$;
- $\overline{b} \rightarrow$ Vetor de injeções de corrente sobre os nós $(n \ge 1)$;
- $n \rightarrow N$ úmero de vértices (nós) da SE;
- $m \to N$ úmero de arestas (ramos chaveáveis) da SE.

Importante: Uma consideração relevante que deve ser feita no tratamento das subestações via Teoria de Grafos, é que sua representação deve se restringir aos disjuntores cujos estados estejam em **fechado**, ou seja, conduzindo corrente elétrica. Deve-se assumir essa restrição pois disjuntores em estado aberto deixariam de ser arestas do conjunto, interligando dois vértices, uma vez que sua função é justamente impedir a passagem de corrente quando abertos. Logo, disjuntores cujos estados estejam em **aberto** não devem compor a matriz de incidência.

No que se refere ao termo independente da Equação (5.1), deve-se atentar a alguns cuidados para sua correta formação, considerando o sentido das correntes numa situação de falta, e a convenção adotada na formação da matriz de incidência do sistema. Para o caso de um curto-circuito em um dos nós da SE, a corrente de curto tem o sentido de sair desse nó, e assim, a fim de preservar a igualdade da equação, deverá assumir sinal positivo no sistema de expressões. Já para as correntes de contribuição, considerando um curto-circuito no interior da subestação, as correntes terão o sentido de estarem entrando em seus nós, e assim, deverão assumir valores negativos no sistema de equações. E finalmente, caso o nó não possua correntes de contribuição ou não esteja sob a ocorrência de curto-circuito, isso indica que não há injeção de corrente e, portanto, seu valor correspondente no vetor de \overline{b} deverá ser nulo. A seguir são resumidas essas três situações.

- $b_i = 0 \rightarrow \text{Caso}$ não haja injeção de corrente no respectivo vértice;
- $b_i < 0 \rightarrow$ Para injeções por corrente de contribuição no respectivo vértice;
- $b_i > 0 \rightarrow$ Para injeções por corrente de curto-circuito no respectivo vértice.

Para assimilação do entendimento, considere o seguinte exemplo de uma subestação, composta de 4 nós (vértices) e 4 disjuntores fechados (arestas).

Figura 5.1 – Identificação do problema para uma subestação.



Fonte: Os autores.

Conforme se observa, ocorreu uma falta no nó de número 3 da subestação. Assumindo-se um sentido arbitrário para as correntes dos disjuntores, e considerando as orientações apresentadas para a construção do problema, obtém-se o seguinte sistema linear:

Desta forma, para solucionar o sistema linear acima, ou seja, para determinar o vetor de incógnitas de \overline{x} , que representam as correntes sobre os ramos chaveáveis, basta aplicar ferramentas de solução de problemas lineares explicitados na forma matricial, como por exemplo, o método de Gauss, conforme apresentado na Seção 2.5.

5.3 Programa

5.3.1 Entrada de dados

Para que o programa seja capaz de executar o algoritmo implementado referente ao segundo estágio do método proposto, são necessárias duas entradas de dados, conforme mostra o fluxograma da Figura 4.1, cujas entradas podem ser ambas do tipo de arquivo no formato de texto. São eles:

- Dados de falta: Correntes de curto-circuito calculadas pelo ANAFAS (1º estágio);
- Dados da subestação: Informações referentes à subestação de interesse.

O primeiro deles, sendo as correntes de falta do primeiro estágio, é gerado a partir do terminal de comando do ANAFAS¹, que permite a exportação de dados em forma de tabela referentes a um curto-circuito na barra de interesse do sistema, com grau de vizinhança igual a 1, ou seja, relaciona a barra de curto às suas barras adjacentes, informando portanto todas as correntes de contribuição para a barra de interesse, que são necessárias para a aplicação do método dos dois estágios.

Figura 5.2 – Arquivo com os dados de curto-circuito, gerado pelo ANAFAS.

ı

$1 \leftarrow 2 \leftarrow 3 \leftarrow 4 \leftarrow 4 \leftarrow 5 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7 \leftarrow 7$	20543; 999999; 20543; 20543; 20533; 20543; 0; 20543; 48190; 20543; 48191; 20543; 48192; 20543; 48187; 20543; 48188; 20543;	0; ; 34.50; 0; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50; 1; ; 34.50;	0.0000; 0.0; 0.0000;-177.8; 1.0249; 0.6; 1.0000; 0.0; 0.0140; -16.1; 0.0161; -16.0; 0.0208; -15.5; 0.0044; -20.2; 0.0051; -19.0;	→ continua

Fonte: ANAFAS.

O arquivo gerado pelo ANAFAS segue o formato conforme mostra a figura acima. Este caso, por exemplo, refere-se a um curto-circuito na barra de n^o 20543 do sistema elétrico, de modo que as duas primeiras linhas apresentam os dados referentes ao curto sobre a barra em questão, e as linhas seguintes apresentam as informações das barras adjacentes com seus respectivos números, sendo que o elemento nulo refere-se às conexões do tipo *shunt*, como geradores ou banco de capacitores conectados diretamente à barra.

De modo a facilitar o tratamento numérico para se referir aos nós internos de uma subestação, admite-se que esses sejam enumerados de modo crescente, partindo-se do valor unitário (1, 2, 3, ...). Uma vez que se é usual que uma das barras internas de uma subestação seja referida pelo mesmo número da barra da subestação em sua modelagem barra-ramo da rede, atribui-se a este nó da SE o n^o 1. A fim de correlacionar as correntes de contribuição do primeiro estágio, com suas conexões e injeções às barras internas da subestação, assume-se que os demais nós da SE sejam enumerados de acordo com a ordem disposta no arquivo exportado pelo ANAFAS, considerando as correntes de contribuição vindas de barras adjacentes (sem considerar as contribuições do tipo *shunt*). Desta maneira, tomando o exemplo acima, seria atribuída a numeração de n^o 2 ao nó da SE que recebe a injeção de corrente proveniente da barra adjacente n^o 20533; o n^o 3 ao nó que recebe a contribuição vinda da barra n^o 48190; e assim por diante, conforme indicado na imagem acima. Para o caso dos demais nós da subestação (se existirem), podem ser enumerados de maneira arbitrária, seguindo a sequência definida pelos nós com injeções (8, 9, 10, ...).

O segundo arquivo de dados de entrada carrega as informações sobre a subestação em seu nível de seção de barras, cuja forma é apresentada a seguir:



Figura 5.3 – Arquivo com os dados da subestação.

Fonte: Os autores.

Conforme se pode observar, a primeira linha fornece os dados gerais sobre a subestação, informando o número de arestas (disjuntores fechados), o número de vértices (nós), o nó da SE em que ocorreu o curto-circuito, e finalmente, os nós em que estão conectadas as contribuições do tipo $shunt^2$. As linhas subsequentes do arquivo informam em duas colunas o sentido início-fim das correntes sobre os ramos chaveáveis (arestas), a partir da numeração estabelecida para todos os seus nós (vértices) discutida anteriormente.

²Nesse exemplo, só foi informado um dígito devido ao fato de existir apenas uma contribuição dessa natureza, conforme se observa na Figura 5.2. Caso existissem mais contribuições desse tipo, poderiam ser escritos na sequência (Ex.: 7; 8; 1; 8; 6; 8).

Os disjuntores são interpretados pela ordem de linhas do arquivo (disjuntor 1, disjuntor 2, ...), e seus sentidos podem ser assumidos de maneira arbitrária. A motivação desse tipo de arquivo de informações referentes à subestação consiste na ideia de que haja um banco de dados para cada subestação do sistema, de modo que seja dispensável inserir manualmente os dados de entrada toda vez que se deseja determinar as correntes de curto-circuito da SE pelo método dos dois estágios.

5.3.2 Algoritmo

O algoritmo do programa referente ao segundo estágio do método divide-se basicamente em duas etapas fundamentais, de modo que, em um primeiro momento, deseja-se construir o problema a ser estudado, conforme descrito na Seção 5.2, a partir dos dados de entrada fornecidos; e em um segundo momento, esse problema é solucionado, para que possam retornar as correntes desejadas ao usuário.

Para a formação da matriz de incidência A do sistema, são necessárias as informações contidas no arquivo sobre os dados da subestação, a partir dos números de disjuntores e de nós da subestação, e dos sentidos "de" e "para" das correntes dos disjuntores.

Variáveis ND, NN
ND ← recebe nº de disjuntores
NN ← recebe nº de nós
Criar matriz D (ND x 2)
Criar matriz de zeros A (NN x ND)
D ← recebe elementos "de" na coluna 1, e "para" na coluna 2
Para ["] i" variando de 1 até ND, faça:
Se D[i][1] = de \rightarrow A[de][i] = -1
Se D[i][2] = para \rightarrow A[para][i] = +1

Para a formação do termo independente \overline{b} do sistema, são necessárias as informações gerais contidas no arquivo de dados da SE, assim como também as correntes de curtocircuito calculadas no primeiro estágio, encontradas no arquivo de dados exportado pelo ANAFAS, que são fornecidas em duas componentes (módulo e fase), em p.u. e graus, respectivamente, para cada fase.

Variáveis BC, NS, NL
BC ← recebe nº da barra de curto
NS ← recebe nº de contribuições por shunt
NL ← recebe nº de contribuições por LT
Criar vetor BS (1 x NS)
Criar vetor b (NN x 1)
BS ← recebe nº das barras com shunt
b[BC][1] \leftarrow recebe corrente de curto-circuito da barra \rightarrow 1*[cos(θ) + jsen(θ)]
Para "i" variando de 1 até NS, faça:
b[BS[i]][1] ← recebe corrente de contribuição shunt, na ordem → - l*[cos(θ) + jsen(θ)]
Para "i" variando de 1 até NL, faça:
b[i+1][1] \leftarrow recebe corrente de contribuição LT, na ordem \rightarrow - I*[cos(θ) + jsen(θ)]

O algoritmo acima descreve um vetor genérico para \overline{b} , no entanto, deve-se gerar um vetor para cada fase do sistema, com suas respectivas correntes fornecidas em colunas separadas no arquivo do ANAFAS. Desta maneira, tem-se três sistemas lineares a serem solucionados, para cada fase sob a ocorrência da falta estudada.

$$A * \overline{x}_A = \overline{b}_A$$
$$A * \overline{x}_B = \overline{b}_B$$
$$A * \overline{x}_C = \overline{b}_C$$

Assim, após formulado o conjunto de sistemas a serem resolvidos, esses são solucionados a partir das operações elementares entre linhas do sistema linear — conforme descrito na Seção 2.5. A lógica aqui empregada foi utilizar as operações elementares entre linhas da matriz a fim de se obter uma matriz identidade em A, com elementos unitários em sua diagonal principal, e elementos nulos nas demais posições. O ganho resultante desse critério adotado ficará mais evidente nos próximos passos do algoritmo.

Variáveis P, F
Criar vetor de zeros LU (1 x NN)
Para cada coluna "j" de A, com "j" variando de 1 até ND, faça:
Para "i" variando de 1 até NN, para "i" que não esteja em LU, faça:
P ← recebe pivô da coluna "j", se A [i] [j] não for nulo
LU ← recebe linha de P
Dividir por P os elementos da linha do pivô em A e b
Para "i" variando de 1 até NN, para "i" que não seja a linha do pivô, faça:
F=A[i][j]
Linha "i" de A = (Linha "i" de A) – (Linha do pivô de A) * F
Linha "i" de b = (Linha "i" de b) – (Linha do pivô de b) * F

Se a subestação possuir mais nós que disjuntores, assume-se que existam linhas redundantes no sistema de equações, e se estas puderem ser descartadas, admite-se uma solução única do problema. Para isso, se existirem de fato linhas redundantes, essas deverão apresentar apenas elementos nulos na matriz estendida do problema, considerando as operações elementares realizadas pelo algoritmo apresentado acima. No entanto, a precisão inerente aos valores das correntes contidas no arquivo exportado pelo ANAFAS, implica no fato de que as operações realizadas pelo algoritmo retorna um valor desprezível (porém diferente de zero) na linha em que se supõe ser redundante. Nesse contexto, para que o sistema tenha solução única, assume-se uma margem de erro, de modo que, para um valor cujo módulo esteja abaixo desse erro, o algoritmo o possa tratar como nulo e, desta forma, permitindo o descarte da linha redundante do problema.

Variáveis VB, erro
erro = 0.001
VB ← recebe tensão base da barra
Criar vetor b' (NN x 1)
Coluna 1 de b' ← recebe módulos das correntes de b
Coluna 2 de b' ← recebe ângulos das correntes de b
Para "i" variando de 1 até NN, faça:
Se a linha "i" de A for nula, faça:
Se a linha "i" da coluna 1 de b' for menor que erro \rightarrow linhas "i" de A e b' são deletadas
Se a linha "i" da coluna 1 de b' for maior que erro:
Tenta deletar a linha "i" novamente para um erro 10x e 100x maior
Se o nº de linhas e de colunas de A for diferente de ND:
Imprime → o sistema não possui solução
Se o nº de linhas e de colunas de A for igual a ND:
b' → é multiplicado pela corrente base: 100000/(√3*VB)
Imprime valores \rightarrow b'
 Se o nº de linhas e de colunas de A for diferente de ND: Imprime → o sistema não possui solução Se o nº de linhas e de colunas de A for igual a ND: b' → é multiplicado pela corrente base: 100000/(√3*VB) Imprime valores → b'

Após descartadas as linhas redundantes do sistema — se existirem —, e se constatado que a matriz A possui dimensão quadrada, assume-se que exista uma solução única, e ainda, considerando que a matriz A foi modificada de tal maneira a torná-la uma matriz identidade I durante as operações elementares entre linhas, tem-se que:

$$A * \overline{x} = \overline{b}$$
$$A = I$$
$$I * \overline{x} = \overline{b}$$
$$\overline{x} = \overline{b}$$

Dessa forma, a solução do problema, ou seja, as correntes sobre todos os disjuntores da subestação, para as três fases, pode ser obtida diretamente a partir dos termos independentes \overline{b} do sistema, retornando ao usuário como um fasor com módulo e ângulo, em ampères e graus, respectivamente.

6 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

6.1 Introdução

O presente capítulo tem por objetivo apresentar as simulações realizadas a partir da ferramenta de análise que fora proposta neste trabalho de conclusão de curso, de modo a se validar o método em dois estágios para o cálculo de curto-circuito no nível de subestação, desde os conceitos e fundamentos nele empregados, até a certificação do funcionamento da ferramenta computacional desenvolvida em função dos propósitos deste trabalho. Posteriormente à comprovação do método, este será aplicado para a aquisição de dados referentes aos estudos de interesse, de modo a se possibilitar a análise da superação de disjuntores, e da expansão da capacidade instalada de geração de sistemas elétricos, ambas as situações considerando o contexto dos curto-circuitos.

O sistema elétrico em análise, mostrado no Anexo A deste documento, situa-se no estado brasileiro do Rio Grande do Norte, que por sua vez está interligado com o SIN. O sistema apresentado é real (ONS, 2019b), e possui 67 barras, 114 circuitos (LTs), 46 transformadores e 13 complexos de geração eólica. O sistema em análise é um equivalente da rede, de modo que sua complexidade e dimensão fora reduzida para se adequar à versão acadêmica do ANAFAS utilizada no presente estudo, que por sua vez é limitada em análise de sistemas cujo número de barras não exceda a 120 barras.

As simulações realizadas sob a aplicação do método proposto, que serão apresentadas na próxima seção, foram desenvolvidas estruturando-as em duas situações principais. Em um primeiro estudo, apresentado na Seção 6.2, foi atribuída uma configuração hipotética de subestação para uma das barras do sistema, cujo objetivo consiste na demonstração do método em dois estágios para obtenção das correntes de curto-circuito incidentes de subestações do sistema. Para o segundo estudo realizado, apresentado na Seção 6.3, a análise será também realizada sobre uma das barras do sistema, contudo, diferentemente ao primeiro estudo, a modelagem no nível de seção de barras será factual à respectiva subestação. A partir dessa nova subestação estudada, a segunda etapa das simulações realizadas subdivide-se em distintas análises, com focos e objetivos específicos em cada uma delas, sendo estes:

- Cálculo das correntes de falta da SE;
- Balanço de cargas diante o seccionamento dos dispositivos chaveáveis da SE;
- Estudo sobre superação de disjuntores;
- Impactos decorrentes à expansão do parque gerador do sistema.

Observação: Os estudos e resultados esperados serão puramente acadêmicos, embora o caso de estudo seja factual e pertença ao SIN, a equipe não dispõe de dados técnicos reais da rede (como por exemplo, valores nominais dos disjuntores instalados nas subestações), de modo que serão atribuídas suposições a fim de viabilizar o estudo. Contudo, a pretensão do presente trabalho trata-se da formulação de um método que seja aplicável aos sistemas elétricos de potência de modo genérico, uma vez que a sistemática proposta possa ser estendida para qualquer caso real.

Todas os estudos de casos realizados, que serão apresentados nas seguintes seções, foram realizados através da metodologia proposta neste trabalho, a partir da aplicação direta do método em dois estágios para o cálculo das correntes de curto-circuito no nível de subestação de sistemas elétricos. Nesse sentido, as simulações foram realizadas seguindo a rotina apresentada no fluxograma da Figura 4.1, sendo que num primeiro estágio, foram obtidas as correntes de contribuição à subestação analisada para o curto-circuito de interesse, através do ANAFAS, e após exportado tais valores, estes serviram de dados de entrada para o segundo estágio, representado pela ferramenta computacional desenvolvida pelos autores, que juntamente às informações referentes à topologia da subestação analisada, permite ao programa retornar os dados de interesse para os estudos realizados.

6.2 Caso de teste - SE de Cutia - 34.5 kV

Conforme já mencionado, a primeira etapa de simulações foi realizada assumindose uma configuração arbitrária de subestação para uma das subestações do sistema elétrico apresentado no Anexo A. Para tanto, as restrições desta atribuição definida consistem em um modelo de subestação que seja coerente com uma das barras do sistema, o que se traduz basicamente em uma subestação com o mesmo número de linhas de transmissão a ela conectadas em relação às subestações do sistema.

Nesse sentido, a barra do sistema escolhida para a simulação foi uma subestação pertencente ao complexo eólico de Cutia — barra n^o 20543, de 34.5 kV. A subestação conta com seis circuitos a ela conectados, sendo cinco linhas de transmissão, por onde cada aerogerador injeta potência ao sistema; um transformador que conecta essa barra à barra de Cutia de 230 kV; e por fim, há também um elemento shunt conectado na barra, sendo este um transformador de aterramento. Assim, a figura a seguir apresenta a configuração, no nível de seção de barras, assumida para a subestação escolhida.



Figura 6.1 – Modelagem no nível de seção de barras para a SE de Cutia 34.5 kV.

Fonte: Adaptado de (Exposito; de la Villa Jaen, 2001).¹

A figura acima apresenta a configuração assumida para a subestação examinada nesse estudo. Conforme se pode observar, a estrutura é constituída por nove ramos chaveáveis, estando sete deles na condição de condução de corrente (fechados), e dois deles na condição de bloqueio de corrente (abertos). Existem oito nós internos à subestação enumerados de 1 à 8 -, sendo que o ponto de curto-circuito assumido foi no barramento correspondente ao nó 1, e ainda, foi assumido que o elemento shunt estaria conectado ao barramento correspondente ao nó 8. As setas em vermelho correspondem às correntes de contribuição do sistema sob a ocorrência do curto-circuito, vindas das respectivas barras vizinhas à subestação de Cutia 34.5 kV, identificadas na imagem pelo número de cada uma delas. Vale recordar que a corrente de curto-circuito, bem como as correntes de contribuição incidentes na SE, são determinadas durante o primeiro estágio do método, geradas pelo ANAFAS. Assim, feitas as devidas identificações até aqui mencionadas, o próximo passo é indicar as variáveis de estado que deseja-se obter, sendo essas as correntes que passam por cada disjuntor em estado de condução (fechados), assumindo-se um sentido arbitrário para cada variável, como se observa nas setas azuis inseridas na imagem acima. Recordando que disjuntores em estado de bloqueio (abertos) não devem entrar no equacionamento, uma vez que não haveria passagem de corrente sob essa condição.

Para essa simulação, foi considerada a ocorrência de um curto-circuito monofásico causado entre a fase A e o terra, cuja falta tenha ocorrido no barramento 1 da subestação de Cutia de 34.5 kV.

Dessa forma, após a inserção dos dados de entrada no programa desenvolvido para o segundo estágio — tanto aqueles referentes às correntes de contribuição do primeiro estágio, quanto as informações sobre a subestação analisada —, no formato de dados

¹Configuração hipotética baseando-se no caso de 14 barras da IEEE.

apropriado para seu correto tratamento, o programa processa as informações e estrutura o seguinte sistema do tipo $A * \overline{x} = \overline{b}$ a ser solucionado:

Sendo o termo independente do sistema linear apresentado acima, o vetor das contribuições das correntes de curto-circuito que incidem sobre cada nó, resultantes do primeiro estágio executado pelo ANAFAS, o programa atribui os valores das respectivas correntes. Assim, o sistema da Equação (6.1) fica expresso da seguinte forma, com valores dados na forma polar, e módulos em p.u.:

Observação: Por simplicidade de representação, está sendo apresentado o sistema linear apenas para a fase A. No entanto, o programa desenvolvido trabalha com os três sistemas criados, um para cada fase.

Conforme se pode observar no sistema matricial acima, a matriz de incidência possui dimensão 8x7 (oito linhas e sete colunas), e o vetor de injeção das correntes de contribuição possui dimensão 1x8 (oito linhas e uma coluna), o que é uma consequência direta devido a subestação apresentar oito nós e sete disjuntores fechados. Dessa maneira, por não se tratar de um sistema linear com o número de equações igual ao número de incógnitas, a solução do mesmo não é direta. O programa considera então a possibilidade de existir uma dependência linear entre suas equações do sistema, ou seja, uma das linhas ser redundante, e se assim for, poderá ser eliminada do problema. Caso a hipótese seja verdadeira, o sistema ficaria então com dimensão 7x7, e assim, assume-se a existência de uma solução única. Dessa forma, o problema passa a ser tratado como a detecção dessa linha redundante do sistema.

Assim, durante as operações lineares no processo de escalonamento e eliminação de Gauss, o programa pôde identificar uma linha nula do sistema $A * \overline{x} = \overline{b}$, o que se traduz em redundância da mesma, permitindo o seu descarte. Em seguida, o programa retorna o novo sistema de equações:

ſ	1	0	0	0	0	0	0		\vec{I}_{D1}		3524.9 <u>/90.4°</u>	
	0	0	0	0	0	0	1		\dot{I}_{D2}		$1519.7 / -93.0^{\circ}$	
İ	0	1	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D3}		216.55 <u>/96.3°</u>	
	0	0	1	0	0	0	0	*	\dot{I}_{D4}	=	216.55 <u>/96.2°</u>	[A]
	0	0	0	1	0	0	0		\dot{I}_{D5}		3309.6 <u>/90.0°</u>	
	0	0	0	0	1	0	0		\dot{I}_{D6}		3072.9 <u>/89.5°</u>	
	0	0	0	0	0	1	0		\dot{I}_{D7}		238.30 <u>/-83.5°</u>	

Como se pode observar, paralelamente ao processo de detecção de linhas redundantes, é realizado o escalonamento sobre a matriz de incidência de tal maneira que essa assume o perfil de uma matriz identidade, que trata-se de uma matriz quadrada com elementos unitários em sua diagonal principal, enquanto seus demais elementos são nulos. Essa percepção fica mais evidente ao se deslocar a segunda linha para a última linha do sistema:

1	0	0	0	0	0	0		$\begin{bmatrix} \dot{I}_{D1} \end{bmatrix}$		3524.9 <u>/90.4°</u>	
0	1	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D2}		216.55 <u>/96.3°</u>	
0	0	1	0	0	0	0		\dot{I}_{D3}		216.55 <u>/96.2°</u>	
0	0	0	1	0	0	0	*	\dot{I}_{D4}	=	3309.6 <u>/90.0°</u>	[A]
0	0	0	0	1	0	0		\dot{I}_{D5}		3072.9 <u>/89.5°</u>	
0	0	0	0	0	1	0		\dot{I}_{D6}		$238.30 / -83.5^{\circ}$	
0	0	0	0	0	0	1		\dot{I}_{D7}		1519.7 <u>/-93.0°</u>	

Assim sendo, a solução do sistema - o fasor de corrente sobre cada disjuntor - é dada diretamente sobre o termo independente do sistema de equações, já convertida para a unidade de corrente elétrica, em ampères, dadas as bases do sistema elétrico.

E finalmente, as correntes de curto-circuito incidentes sobre cada disjuntor da subestação de Cutia 34.5 kV, para as três fases do sistema, obtidas a partir da aplicação do método em dois estágios proposto neste trabalho, são apresentadas na tabela a seguir.

	Fase A	Fase B	Fase C
\dot{I}_{D1}	3524.9 <u>/90.4°</u>	433.10 <u>/156°</u>	433.10 <u>/36.3°</u>
\dot{I}_{D2}	216.55 <u>/96.3°</u>	$216.55 \ /-23.7^{\circ}$	$216.55 \ /-144^{\circ}$
\dot{I}_{D3}	216.55 <u>/96.2°</u>	$216.55 \ /-23.8^{\circ}$	$216.55 \ /-144^{\circ}$
\dot{I}_{D4}	3309.6 <u>/90.0°</u>	649.64 <u>/156°</u>	649.64 <u>/36.3°</u>
\dot{I}_{D5}	3072.9 <u>/89.5°</u>	887.95 <u>/156°</u>	887.95 <u>/36.3°</u>
\dot{I}_{D6}	$238.30 \ / -83.5^{\circ}$	238.30 <u>/157°</u>	238.30 <u>/36.5°</u>
\dot{I}_{D7}	1519.7 /-93.0°	1330.9 /40.6°	1134.3 /145°

Tabela 6.1 – Correntes de curto-circuito (em ampères) sobre cada disjuntor da subestação de Cutia - 34.5 kV, calculadas aplicando-se o método em dois estágios.

Uma simples checagem pode ser realizada a fim de analisar os resultados obtidos. Considerando a contribuição de corrente de falta incidente no nó 2 da subestação, vindas da barra vizinha 20533, podemos assumir a seguinte relação ao aplicar a Lei das Correntes de Kirchhoff:

$$\dot{I}_{20533} = \dot{I}_{D7}$$

Para verificar essa condição, se faz necessário converter o valor em p.u. da corrente de contribuição para a unidade de corrente, multiplicando-o pela corrente base apropriada, que é dada pelas potência e tensão bases atribuídas ao sistema elétrico. Assim:

$$S_{base} = 100 \text{ MVA}$$
$$V_{base} = 34.5 \text{ kV}$$
$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} * V_{base}}$$
$$I_{base} = 1673.5 \text{ A}$$

E finalmente, multiplicando o valor da corrente em p.u. pela base obtida acima, tem-se seu valor em ampères:

$$\dot{I}_{20533} = 0.9081 / -93.0^{\circ} \text{ p.u.}$$

 $\dot{I}_{20533} = 0.9081 / -93.0^{\circ} * I_{base}$
 $\dot{I}_{20533} = 1519.7 / -93.0^{\circ} \text{ A}$

E como se observa na Tabela 6.1, o valor encontrado para a corrente do disjuntor D7 corresponde exatamente à corrente de contribuição vinda da barra 20533 do sistema, conforme se era esperado.

6.3 Caso de estudo - SE de João Câmara II - 230 kV





A figura apresentada acima corresponde a configuração factual da subestação elétrica da barra de n^o 8477, presente no sistema elétrico descrito no Anexo A, nomeada por SE de João Câmara II - 230 kV. Conforme se observa, trata-se de uma subestação cuja topologia consiste em um barramento duplo com um disjuntor interligador. O sistema elétrico que a subestação está inserida, trata-se de um equivalente da rede existente no estado brasileiro do Rio Grande do Norte, referente ao ano de 2019.

Para aplicação do método em dois estágios para o caso de estudo da subestação de João Câmara II - 230 kV, as simulações foram subdivididas em quatro blocos de estudo, conforme já mencionado no início deste capítulo. Num primeiro momento, é feita a análise das correntes incidentes nos ramos chaveáveis sob a ocorrência de uma falta monofásica em um dos nós da SE, a fim de demonstrar o funcionamento do método desenvolvido para o respectivo caso de estudo. Na sequência, é apresentado um estudo referente ao balanceamento de cargas incidentes sobre os dois barramentos da subestação, conforme se secciona as LTs a um ou outro barramento, avaliando como esse fator pode impactar nas correntes de curto-circuito, enfatizando o elemento interligador da SE. Em seguida, é feita a análise de superação dos disjuntores da subestação, aplicando o método em dois estágios para as três condições de superação (curto-circuito na barra, de curto-circuito na linha, e de line-out), conforme apresentada no Capítulo 3, fazendo-se um comparativo com a análise de superação realizada pelo ONS através do algoritmo elaborado pelo ANAFAS. E finalmente, é realizado um estudo considerando a expansão da rede elétrica e a implantação de um novo complexo gerador eólico conectado à subestação, conforme mostrado no Anexo B, de modo a se avaliar seu impacto nos níveis de curto-circuito da SE e na superação de seus disjuntores.

6.3.1 Correntes de falta monofásica

Figura 6.3 – Curto-circuito monofásico ocorrido na SE de João Câmara II - 230 kV. Correntes em ampères.



Assume-se a ocorrência de um curto-circuito monofásico na fase A, sobre um dos barramentos da subestação de João Câmara II - 230 kV, sendo identificado como nó n^o 1, e as correntes de contribuição apresentadas na Figura 6.3. Desta forma, após inseridas as correntes de contribuição do respectivo curto-circuito obtidas no primeiro estágio — representadas pelas setas vermelhas na imagem, com seus valores em ampères —, o programa retorna o seguinte resultado referente ao segundo estágio do método, após

a solução do problema linear construído, já apresentando o sistema em sua forma reduzida e escalonada:

Desta forma, a partir do sistema acima, obtém-se os valores das correntes dos disjuntores da subestação estudada, apresentando-as na tabela a seguir.

Tabela 6.2 – Correntes sobre os disjuntores da SE de João Câmara II - 230 kV, calculadas aplicando-se o método em dois estágios, para uma falta monofásica no nó de nº 1 da SE. Correntes em ampères.

Disjuntor	Falta monofásica
\dot{I}_{D1}	$1575.7 \ /-89.0^{\circ}$
I_{D2}	8708.5 <u>/93.6°</u>
I_{D3}	$1657.5 / -89.0^{\circ}$
I_{D4}	$1736.0 / -88.8^{\circ}$
I_{D5}	$3753.9 \ /-86.9^{\circ}$
I_{D6}	$3753.9 / -86.9^{\circ}$
I_{D7}	$637.72 / -87.2^{\circ}$
I_{D8}	$1767.5 / -82.2^{\circ}$
I_{D9}	$1778.0 / -82.5^{\circ}$
I_{D10}	$277.23 / -90.0^{\circ}$
I_{D11}	977.53 <u>/-87.4°</u>

6.3.2 Balanço de carga



Figura 6.4 – Curto-circuito trifásico ocorrido na SE de João Câmara II - 230 kV. Correntes em ampères.

Assumindo-se a ocorrência de uma falta trifásica no barramento n^o 1 da SE de João Câmara II - 230 kV, obtém-se as correntes de contribuição referentes ao primeiro estágio, conforme apresentado na Figura 6.4. Direcionando o foco da análise ao disjuntor interligador da subestação — disjuntor D_2 —, obtém-se sua corrente de curto-circuito aplicando-se o método em dois estágios.

$$\dot{I}_{D2} = 8962.2/93.4^{\circ}A$$

Considerando o mesmo caso de curto-circuito da situação anterior, vamos assumir agora que a linha de transmissão referente ao circuito n^o 48236/1 seja seccionada para o outro barramento da subestação, a partir da inversão dos estados dos dispositivos chaveáveis (ON/OFF) referentes àquela respectiva LT. Ou seja, a corrente de contribuição vinda dessa linha, passará a ser injetada no barramento n^o 1 da SE, ao invés do barramento n^o 12 da mesma, conforme se observa na figura a seguir.





Assim, refazendo-se o cálculo da corrente passante sobre o disjuntor interligador da subestação, tem-se que:

$$\dot{I}_{D2} = 3315.8/93.9^{\circ}A$$

Conforme se pode notar, atentando-se ao módulo da corrente incidente sobre o disjuntor interligador, houve uma considerável redução de seu valor a partir de um simples seccionamento dos dispositivos chaveáveis que conectam os barramentos principais da subestação a uma das linhas de transmissão, que por sua vez, detém a maior corrente de contribuição ao curto-circuito ocorrido, juntamente à outra linha que também conecta a barra de nº 48236 do sistema.

Simulando agora uma última situação, de modo que sejam mantidos os mesmos estados dos disjuntores após a modificação feita anteriormente, porém alterando o local do curto-circuito, sendo que dessa vez, este tenha ocorrido no outro barramento principal da subestação. Ou seja, a falta trifásica passa a ser incidente sobre o barramento n^o 12 da subestação, conforme apresenta a figura a seguir.

Figura 6.6 – Alteração do local da ocorrência do curto-circuito trifásico. Correntes em ampères.



E finalmente, calculando-se novamente a corrente do disjuntor interligador, através do método em dois estágios, temos que:

$$\dot{I}_{D2} = 15048 / -86.7^{\circ} A$$

A partir dos resultados apresentados, nota-se que a depender do seccionamento das LTs a um ou outro barramento da subestação, impacta-se diretamente sobre a corrente que incide sobre o disjuntor que interliga ambos os barramentos. Dessa forma, no segundo caso simulado, percebe-se que conectando-se as grandes contribuições de corrente diretamente ao barramento em que ocorreu o curto-circuito, a corrente sobre o disjuntor interligador reduz drasticamente, o que é trivial de se compreender, uma vez que esta corrente passa a escoar diretamente ao ponto de curto-circuito, ao invés de necessitar passar pelo ramo de interligação entre os barramentos, conforme acontecia no primeiro caso simulado. No entanto, os curto-circuitos são passíveis de se ocorrer em ambos os lados do barramento duplo da subestação, e conforme apresentado no terceiro caso, modificando o ponto de curto, a corrente sobre o disjuntor interligador elevou-se drasticamente, mais uma vez sendo o efeito de fácil compreensão, uma vez que as grandes contribuições de corrente que chegam à subestação carecem de passar pelo ramo de interligação para chegar ao ponto de falta.

Assim, pode-se notar que a subestação deve estar preparada para atuar de forma segura e eficiente em ambas as situações, considerando a ocorrência de um curto-circuito em qualquer lado de seus barramentos. Nesse sentido, é coerente afirmar que a condição ideal seja o caso em que haja um equilíbrio entre as injeções de correntes sobre ambos os barramentos, pois dessa maneira garante-se que não ocorram assimetrias agudas entre as correntes incidentes, o que implica em se evitar dimensionamento desnecessário de capacidade de interrupção dos disjuntores. Tomando como exemplo os últimos casos apresentados, em que havia uma discrepância entre as correntes de contribuição sobre cada barramento da subestação, o disjuntor interligador deveria estar apto a interromper a corrente de 15 kA, mesmo que no caso anterior a corrente de falta tenha sido bastante inferior, com aproximadamente 3 kA.

Nesse contexto, será realizado um estudo de otimização linear, a fim de avaliar o caso em que há o melhor balanceamento de cargas sobre os barramentos da subestação de João Câmara II - 230 kV, a partir do seccionamento dos disjuntores que a conectam às linhas de transmissão. Para isso, será considerado o caso das correntes de curto-circuito do primeiro estágio para a falta trifásica ocorrida na SE, e por simplicidade de análise, serão tratados apenas os módulos das correntes de contribuição, o que deve produzir resultados satisfatórios, uma vez que as fases das correntes são bastante próximas, conforme se consta na Figura 6.4.

Para estruturar o problema de otimização linear (P.O.L.) proposto, serão introduzidos os seguintes vetores, que serão estes as variáveis do sistema:

- \overline{D} : Disjuntores conectados ao barramento nº 1 da SE $\rightarrow \overline{D} = [D_1 \ D_3 \ D_4 \ \dots \ D_{11}]$
- $\overline{D'}$: Disjuntores conectados ao barramento nº 12 da SE $\rightarrow \overline{D'} = [D'_1 \ D'_3 \ D'_4 \ \dots \ D'_{11}]$

Conforme se observa, são considerados todos os disjuntores adjacentes à SE, conectados aos barramentos que interligam os barramentos principais da subestação às linhas de transmissão, deixando, portanto, o disjuntor D_2 de fora dos vetores, uma vez que este trata-se do disjuntor interligador.

Ambos os vetores – \overline{D} e $\overline{D'}$ – referem-se aos estados dos disjuntores, de natureza binária, de modo que:

- $D_i \in D'_i = 0$, se os disjuntores estiverem no estado aberto (OFF);
- $D_i \in D'_i = 1$, se os disjuntores estiverem no estado fechado (ON);
- $i = [1 \ 3 \ 4 \ 5 \ 6 \ 7 \ 8 \ 9 \ 10 \ 11].$

Assim sendo, nota-se que uma das restrições do problema consiste no fato de que se um disjuntor D_i estiver ligado (igual a um), o disjuntor de mesmo índice D'_i deve estar desligado (igual a zero), e o mesmo vale para o sentido contrário da hipótese, uma vez que se assume a condição de que uma LT só pode estar conectada a um dos barramentos da subestação por vez.

Assim, a função objetivo do P.O.L. trata-se de um problema de minimização, de modo que o ótimo consiste no caso onde se obtém a menor diferença (em módulo) entre o somatório das correntes que incidem sobre o barramento n^o 1 da subestação, com o somatório das correntes que incidem sobre o barramento n^o 12 da mesma. A partir dessas informações, o problema de otimização pode ser descrito da seguinte forma:

Para resolver o problema de otimização acima, é feito o uso da função "glpk" para soluções de programação linear² no ambiente de programação GNU Octave. A entrada de dados referente ao problema de otimização proposto, inserida no editor do programa, é apresentado na sequência.

 $[\]label{eq:linear} \ensuremath{^2\text{Linear}}\ensuremath{\,^2\text{Programming}}\ensuremath{\,^2\text{Linear}}\ensuremath{\,^2\text{Corr}}\ensuremath{\,^2$

Figura 6.7 – Entrada de dados no GNU Octave para solução do P.O.L.

```
# Correntes de contribuição [A]
I1 = 608.23; I3 = 610.01;
I4 = 611.77; I5 = 5646.5;
I6 = 5646.5; I7 = 0.0;
   = 2107.0;
               I9 = 1969.2;
I8
I10 = 432.31;
              I11 = 739.41;
# Coeficientes da função objetivo
c = [I1 -I1 I3 -I3 I4 -I4 I5 -I5 I6 -I6 I7 -I7 I8 -I8 I9 -I9 I10 -I10 I11 -I11]
# Coeficientes das restrições
0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
     0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
                                         0 0;
                                       0 0 0;
                               1
                                           0;
     0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
                                       1 0 0;
     I1 -I1 I3 -I3 I4 -I4 I5 -I5 I6 -I6 I7 -I7 I8 -I8 I9 -I9 I10 -I10 I11 -I11]
# Valores das restrições Ax = b | Ax >= b
b = [1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 0]
lb = zeros(1,20) # Limite inferior
ub = ones(1,20) # Limite superior
s = 1 # Problema de minimização
ctype = "SSSSSSSSSL" # Tipo de restrição (na ordem) (S p/ =) e (L p/ >=)
vartype = "IIIIIIIIIIIIIIIII" # Tipo de variáveis (I p/ inteiras)
[x,z] = glpk(c, A, b, lb, ub, ctype, vartype, s)
```

Fonte: Os autores.

Dessa forma, executando os comandos acima e compilando-os no GNU Octave, obtém-se a seguinte solução ótima do sistema:

 $\overline{D}^* = [1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0]$ $\overline{D'}^* = [0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$ $Z^* = 161.57$

Tem-se então como deve ser feito o seccionamento dos disjuntores, a fim de se obter o caso ótimo de balanceamento de cargas sobre os barramentos da subestação, de modo que o valor ótimo da função objetivo encontrado representa justamente o menor desvio possível entre as injeções de cada barramento. Para avaliar essa condição ótima, propõe-se avaliar a subestação sobre essa distribuição de correntes sobre os barramentos, conforme mostra a figura a seguir.



Figura 6.8 – Configuração ótima para o melhor equilíbrio de cargas na SE.

Similarmente ao que fora feito antes de aplicar o método de otimização, consideremos a aplicação de um curto-circuito trifásico em ambos os barramentos principais da subestação, a fim de se obter a corrente sobre o disjuntor interligador para cada caso.

$$\dot{I}_{D2}^{c.c.\to 1} = 9105.5/93.5^{\circ}A$$

 $\dot{I}_{D2}^{c.c.\to 12} = 9262.6/-86.7^{\circ}A$

Assim, verificando o desvio entre os valores eficazes das correntes acima, tem-se:

$$I_{D2}^{c.c.\to 12} - I_{D2}^{c.c.\to 1} = 157.10A$$

A diferença entre o desvio encontrado acima e o valor ótimo da função obtido no problema de otimização, deve-se às simplificações assumidas no estudo, ao considerarmos apenas os módulos das correntes de contribuição. No entanto, resultaram em valores satisfatoriamente próximos, e ainda, asseguram o equilíbrio de injeções de corrente buscado, de modo que, sob ambas as condições de curto-circuito, sobre cada um dos barramentos da subestação, a corrente incidente sobre o disjuntor interligador assumiu níveis semelhantes.

6.3.3 Superação de disjuntores

Para realização da análise de superação por correntes de curto-circuito dos disjuntores da subestação de João Câmara II - 230 kV (barra nº 8477 do sistema elétrico considerado), os estudos e simulações serão desenvolvidos partindo-se das orientações e diretrizes apresentadas na Subseção 3.2.1, aplicando as condições de curto-circuito na barra, na linha, e de *line-out*. Nesse sentido, as simulações serão realizadas primeiramente na ferramenta específica de análise de superação de disjuntores disponível no programa ANAFAS, que aplica automaticamente as três condições de falta na modelagem barra-ramo da rede; e posteriormente, cada condição será reproduzida no ANAFAS DOS para exportação das correntes de falta, a fim de introduzir como dados de entrada para a execução do método em dois estágios, para então estudar as distribuições de corrente no nível de seção de barras da SE, considerando os curto-circuitos na barra, nas linhas, e nas situações de line-out. A configuração da subestação considerada para aplicação do método é aquela apresentada na Figura 6.2. O objetivo é justamente comparar os resultados, diante da situação dos disjuntores averiguada – Superado, em Alerta, ou OK, conforme mostra o Capítulo 3 – através do comparativo entre as duas abordagens: pelo ANAFAS e pelo método em dois estágios. Recordando que, para a análise da situação dos disjuntores da SE, serão assumidos valores hipotéticos para a capacidade de interrupção simétrica nominal dos mesmos, a fim de viabilizar o estudo.

6.3.3.1 Análise de superação através do ANAFAS

Primeiramente, realizou-se a simulação para uma capacidade de interrupção simétrica (ICCS) de 20 kA, e os resultados obtidos estão mostrados na tabela a seguir.

Dorro			ICC [kA]	Relaç	Situação			
Ddffd	ICC [KA]	FT	3F	FFT	FT	3F	FFT	Situação
48350	20	16,83	17,63	17,27	84,2	88,2	86,4	OK
48348	20	17,17	18,36	17,82	<mark>85,</mark> 9	91,8	89,1	Alerta
48111	20	17,54	17,93	17,75	87,7	89,7	88,8	ОК
8478/1	20	17,71	18,21	17,98	<mark>88,</mark> 6	91,1	<mark>89,</mark> 9	Alerta
8478/2	20	17,71	18,21	17,98	<mark>88,</mark> 6	91,1	<mark>89,</mark> 9	Alerta
7353	20	16,08	18,21	17,38	80,4	91,1	86,9	Alerta
8653	20	16,76	17,48	17,20	83,8	87,4	86,0	OK
8607	20	16,83	17,41	17,18	84,2	87,1	<mark>85,</mark> 9	ОК
48236/1	20	16,91	16,96	16,95	84,6	84,8	84,8	ОК
48236/1	20	16,91	16,96	16,95	84,6	84,8	84,8	OK
Interligador	20	17,71	18,36	17,98	<mark>88,</mark> 6	91,8	<mark>89,</mark> 9	Alerta

Tabela 6.3 – Análise de superação de disjuntores do ANAFAS para a barra 8477, para uma capacidade de interrupção simétrica de 20 kA.

Na análise realizada pelo ONS, o disjuntor interligador é dimensionado pelo maior valor de corrente de curto-circuito que passa pelos disjuntores, que neste caso, são os disjuntores dos transformadores TR1 e TR2, que estão conectados à barra 8478.

Se a ICCS for de 20 kA, os disjuntores dos circuitos dos transformadores, conectados às barras 8478 e 7353, e do interligador, estão em *Alerta*, pois as correntes passantes por estes dispositivos atingiram mais de 90% da capacidade de interrupção simétrica.

Para que não haja a necessidade de investigar o TRT e o X/R, foi feita uma nova análise de superação dos disjuntores para uma ICCS de 31.5 kA. Nessa nova condição, todos os disjuntores estão classificados como OK, e com a relação da corrente de curto-circuito pela capacidade de interrupção menor que 70%, conforme apresentado na tabela seguinte.

Tabela 6.4 – Análise de superação de disjuntores do ANAFAS para a barra 8477, para uma capacidade de interrupção simétrica de 31.5 kA.

Barra			ICC [kA]		Rela	ição ICC/ICCS	[%]	Situação
	ICCS [KA]	FT	FFT	3F	FT	FFT	3F	Situação
48350	31,5	16,83	17,27	17,63	53,4	54,8	56,0	ОК
48348	31,5	17,17	17,82	18,36	54,5	56 <mark>,</mark> 6	58,3	ОК
48111	31,5	17,54	17,75	17,93	55,7	56,3	56,9	ОК
8478/1	31,5	17,71	17,98	18,21	56,2	57,1	57,8	ОК
8478/2	31,5	17,71	17,98	18,21	56,2	57,1	57,8	ОК
7353	31,5	16,08	17,38	18,21	51,0	55,2	57,8	ОК
8653	31,5	16,76	17,20	17,48	53,2	54,6	55,5	OK
8607	31,5	16,83	17,18	17,41	53,4	54,5	55,3	ОК
48236/1	31,5	16,91	16,95	16,96	53,7	53,8	53,8	ОК
48236/2	31,5	16,91	16,95	16,96	53,7	53,8	53,8	ОК
Interligador	31,5	17,71	17,98	18,36	56,2	57,1	58,3	ОК

6.3.3.2 Dois estágios - Curto-circuito na barra

Uma vez que no nível de seção de barras permite-se acessar os ramos e nós internos da subestação, a fim de se aplicar a condição de curto-circuito na barra, foram consideradas duas situações de curto-circuito. Nesse sentido, admitiu-se a ocorrência de uma falta em cada barramento principal da subestação, ou seja, os barramentos em que foram atribuídos os nós 1 e 12 de sua modelagem no nível de seção de barras. Assim, as simulações para a condição de curto-circuito na barra pelo método de dois estágios estão apresentadas nas tabelas seguintes, de modo que para cada barramento de curto-circuito considerado, foram aplicadas as faltas monofásica, bifásica-terra e trifásica, e ainda, os resultados são mostrados pelo módulo da corrente de fase mais elevada para cada disjuntor.

Tabela 6.5 –	- Correntes para a	as faltas FT	$^{\circ}$, FFT e 3F	, ocorridas no	nó n o 1 da	SE 8477 no
	nível de seção de	e barras. Co	orrentes em	módulo e em	ampères.	

Tipo	de curto	FT	FFT	3F
	D1	1575,7	1352,1	608,23
	ID2	8708,5	8864,3	8962,2
	D3	1657,5	1425,9	610,01
	D4	1736,0	1497,4	611,77
ţ	D5	3753,9	4995,0	5646,5
uni	D6	3753,9	4995,0	5646,5
Dis	D7	637,72	619,07	0,00
	D8	1767,5	2015,3	2107,0
	D9	1778,0	1933,8	1969,2
	D10	277,23	380,20	432,31
	D11	977,53	898,88	739,41

Tabela 6.6 – Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó nº 12 da SE 8477 no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em ampères.

Tipo	de curto	FT	FFT	3F
	ID1	1575,7	1352,1	608,23
Γ	D2	9102,0	9281,6	9401,8
Γ	D3	1657,5	1425,9	610,01
	ID4	1736,0	1497,4	611,77
Į	D5	3753,9	4995,0	5646,5
jun	D6	3753,9	4995,0	5646,5
Dis	D7	637,72	619,07	0,00
	D8	1767,5	2015,3	2107,0
	D9	1778,0	1933,8	1969,2
	D10	277,23	380,20	432,31
	D11	977.53	898.88	739.41

6.3.3.3 Dois estágios - Curto-circuito na linha

Para aplicação das condições de curto-circuito na linha, foram considerados curtocircuitos ocorridos nos nós da SE em que estão conectadas as respectivas linhas de transmissão sob ocorrência da falta. Por exemplo, para a situação de curto-circuito na linha que conecta a SE 8477 com a SE 48350, admite-se a ocorrência do curto no nó n^o 2 da subestação. Desta forma, são aplicados os três tipos de curto-circuito — monofásico, bifásico-terra e trifásico — para cada LT, atribuindo-se a condição de curto na barra calculado no primeiro estágio, como sendo o curto na LT, a fim de se inserir como dados de entrada para o segundo estágio. As simulações realizadas são apresentadas nas tabelas a seguir, divididas por tipo de curto-circuito, considerando as faltas ocorridas em todas as LTs, obtendo-se a corrente em todos os disjuntores sob cada situação. Os resultados são mostrados pelo módulo da corrente de fase mais elevada para cada disjuntor.

a) Falta monofásica

Tabela 6.7 – Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica nas LTs da SE, em módulo e em ampères.

LT	curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	Máx
	ID1	1575,7	16236	1575,7	1575,7	1575,7	1575,7	1575, <mark>7</mark>	1575,7	1575 <mark>,</mark> 7	1575,7	16236
	D2	8708,5	<mark>8708,</mark> 5	9102,0	8708,5	9102,0	8708,5	9102,0	8708,5	9102,0	9102,0	9102,0
	ID3	1657,5	1657,5	16154	1657,5	1657,5	1657,5	1657,5	1657,5	1657,5	1657,5	16154
	D4	16076	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	1736,0	16076
tor	D5	3753,9	3753 <mark>,</mark> 9	3753,9	3753 <mark>,</mark> 9	3753,9	3753,9	14057	3753,9	3753,9	3753,9	14057
jun	D6	3753,9	3753,9	3753,9	3753,9	3753,9	3753,9	3753,9	14057	3753,9	3753,9	14057
Dis	ID7	637,72	637,72	637,72	637,72	637,72	637,72	637,72	637,72	17173	637,72	17173
	D8	1767,5	1767,5	1767,5	16049	1767,5	1767,5	1767,5	1767,5	1767,5	1767,5	16049
	D9	1778,0	1778,0	1778,0	1778,0	16037	1778,0	1778,0	1778,0	1778,0	1778,0	16037
	ID10	277,23	277,23	277,23	277,23	277,23	17534	277,23	277,23	277,23	277,23	17534
	D11	977,53	977,53	977,53	977,53	977,53	977,53	977,53	977,53	977,53	16833	16833

b) Falta bifásica-terra

Tabela 6.8 – Correntes de curto-circuito para uma falta bifásica-terra nas LTs da SE, em módulo e em ampères.

LT	curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	Máx
	D1	1352,1	17101	1352,1	1352,1	1352,1	1352,1	1352,1	1352,1	1352,1	1352,1	17101
	D2	8864,3	8864,3	9281,6	8864,3	9281,6	8864,3	9281,6	8864,3	9281,6	9281,6	9281,6
	D3	1425,9	1425,9	17068	1425,9	1425,9	1425,9	1425,9	1425,9	1425,9	1425,9	17068
	D4	17033	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	1497,4	17033
to	D5	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	13416	4995,0	4995,0	4995,0	13416
juni	D6	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	4995,0	13416	4995,0	4995,0	13416
Dis	D7	619,07	619,07	619,07	619,07	619,07	619,07	619,07	619,07	17819	619,07	17819
	D8	2015,3	2015,3	2015,3	16195	2015,3	2015,3	2015,3	2015,3	2015,3	2015,3	16195
	D9	1933,8	1933,8	1933,8	1933,8	16269	1933,8	1933,8	1933,8	1933,8	1933,8	16269
	ID10	380,20	380,20	380,20	380,00	380,20	17749	380,20	380,20	380,20	380,20	17749
	ID11	898,88	898,88	898,88	898,88	898,88	898,88	898,88	898,88	898,88	17269	17269

c) Falta trifásica

LT	<mark>curto</mark>	<mark>735</mark> 3	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	<mark>48348</mark>	48350	Máx
	D1	608,23	17756	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	17756
	D2	8962,2	8962,2	9401,8	8962,2	9401,8	8962,2	9401,8	8962,2	9401,8	9401,8	9401,8
	ID3	610,01	610,01	17755	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	17755
	D4	17753	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	17753
tor	D5	5646,5	5646,5	<mark>5646,</mark> 5	5646,5	5646,5	5646,5	12718	5646,5	5646,5	5646,5	12718
jun	D6	5646,5	5646,5	5646,5	5646,5	5646,5	5646,5	5646,5	12718	5 <mark>646,</mark> 5	5646,5	12718
Dis	D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18364	0,00	18364
	D8	2107,0	2107,0	2107,0	16259	2107,0	2107,0	2107,0	2107,0	2107,0	2107,0	16259
	D9	1969,2	1969,2	1969,2	1969,2	16397	1969,2	1969,2	1969,2	1969,2	1969,2	16397
	D10	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	17932	432,31	432,31	432,31	432,31	17932
	ID11	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	17625	17625

Tabela 6.9 – Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica nas LTs da SE, em módulo e em ampères.

Conforme se observa na última coluna das tabelas acima, foram destacadas as maiores correntes em módulo encontradas para cada disjuntor, considerando todas as situações de curto nas LTs simuladas, uma vez que, sendo essa uma análise de superação de disjuntores, os maiores valores de correntes assumidos consistem nas informações mais relevantes ao respectivo estudo.

6.3.3.4 Dois estágios - Curto-circuito de *line out*

Para aplicação de condições de *line out*, no que concerne ao segundo estágio, segue-se as mesmas diretrizes assumidas no casos de curto-circuito nas LTs, porém com a consideração adicional da queda da respectiva linha. Por exemplo, para a situação de *line out* em que a linha que conecta a SE 8477 com a SE 48350 esteja fora de operação, admite-se a ocorrência do curto no nó n^o 2 da subestação. O que muda, portanto, são os dados referentes ao primeiro estágio, uma vez que no ANAFAS se permite exportar os dados de uma ocorrência de curto-circuito na barra, considerando o desligamento de uma LT. As simulações realizadas são apresentadas nas tabelas a seguir, divididas por tipo de curto-circuito, considerando as quedas de cada LT, obtendo-se a corrente em todos os disjuntores sob cada situação. Os resultados são mostrados pelo módulo da corrente de fase mais elevada para cada disjuntor.

a) Falta monofásica

Tabela 6.10 – Correntes de curto-circuito	para uma	falta monofási	ca de	line	out	da	SE,
em módulo e em ampères.							

LT	out	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	<mark>48</mark> 348	48350	Máx
	D1	1868,6	16288	1858,0	1580,3	1594,5	1561,0	1527,4	1527,4	1647,9	1605,9	16288
	ID2	8799,8	8806,4	9322,6	9270,3	9633,8	8712,3	11925	11522	9079,6	9092,6	11925
	ID3	1964,1	1940,8	16175	1662,5	1677,9	1641,6	1605,2	1605,2	1735,7	1690,3	16175
	ID4	16064	2030,6	2043,3	1741,3	1757,9	1719,0	1679,9	1679,9	1820,0	1771,2	16064
tor	D5	3440,5	3484,2	3462,2	3959,6	3913,0	3782,6	16905	6542,1	3612,6	3694,8	16905
jun	D6	3440,5	3484,2	3462,2	3959,6	3913,0	3782,6	6542,1	16905	3612,6	3694,8	16905
Dis	ID7	743,30	728,57	736,00	640,73	650,12	628,03	605,87	605,87	17084	657,65	17084
	D8	1712,0	1719,8	1715,9	16825	2103,5	1772,6	1898,4	1898,4	1742,3	1756,8	16825
	D9	1747,0	1751,4	1749,2	2126,6	16764	1780,8	1894,0	1894 <mark>,</mark> 0	1763,9	1771,9	16764
	D10	251,55	255,14	253,33	276,50	274,22	17540	284,96	284,96	265,63	272,38	17540
	D11	1017,2	1011,6	1014,4	978,53	982,02	973,89	965,58	965,58	995,35	16808	16808

b) Falta bifásica-terra

Tabela 6.11 – Correntes de curt	o-circuito para	uma falta	bifásica-terra	de <i>line</i>	out	da SE
em módulo e em	ampères.					

LT	out	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	Máx
	D1	1525,3	17453	1521,9	1354,4	1360,7	1346,0	1331,1	1331,1	1382,2	1365,7	17453
	D2	9046,9	9048,6	9641,4	9563,1	9958,6	8864,3	12817	12359	9278,4	9282,7	12817
	D3	1601,8	1593,3	17418	1428,4	1435,3	1419,3	1403,0	1403,0	1458,8	1440,7	17418
	D4	17378	1666,9	1672,0	1500,0	1507,4	1490,2	1472,6	1472,6	1533,0	1513,4	17378
tor	D5	4965,2	4968,4	4966,4	5288,8	5263,4	4998,3	16949	8480,1	4982,3	4991,4	16949
jun	D6	4965,2	4968,4	4966,4	5288,8	5263,4	4998,3	8480,1	16949	4982,3	4991,4	16949
Dis	D7	664,96	658,98	662,02	620,02	624,42	614,58	603,78	603,78	17802	628,51	17802
	D8	2011,5	2012,1	2011,8	17177	2448,9	2015,6	2168,6	2168,6	2013,1	2014,0	17177
	D9	1932,5	1932,7	1932,7	2371,1	17198	1933,9	2075,3	2075,3	1933,0	1933,2	17198
	D10	378,64	378,84	378,77	380,57	380,45	17751	381,00	381,00	379,29	379,97	17751
	D11	911,54	909,83	910,66	899,59	900,87	897,68	894,72	894,72	904,96	17264	17264

c) Falta trifásica

LT	out	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	Máx
	D1	836,38	18211	835,48	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	18211
	D2	9190,7	9188,9	9857,2	9781,9	10187	8962,2	13486	13035	9401,8	9401,8	13486
	D3	838,82	837,01	18210	610,01	610,01	610 <mark>,</mark> 01	610,01	610,01	610,01	610,01	18210
	D4	18209	839,42	840,32	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	18209
ğ	D5	5646,5	5646,5	5646,5	5974,5	5948,1	5646,5	16964	9557,4	5646,5	5646,5	16964
iun	D6	5646,5	5646,5	5646,5	5974,5	5948,1	5646,5	9557,4	16964	5646,5	5646,5	16964
Dis	D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	18364	0,00	18364
	D8	2107,0	2107,0	2107,0	17407	2591,9	2107,0	2279,9	2279,9	2107,0	2107,0	17407
	D9	1969,2	1969,2	1969,2	2461,9	7483,4	1969,2	2130,7	2130,7	1969,2	1969,2	7483,4
	ID10	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	17932	432,31	432,31	432,31	432,31	17932
	D11	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	17625	17625

Tabela 6.12 – Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica de *line out* da SE, em módulo e em ampères.

6.3.3.5 Análise de superação através do método em dois estágios

A partir dos resultados encontrados nas simulações realizadas através do método de dois estágios, apresentadas nas tabelas anteriores, assume-se em seguida o maior módulo de corrente de curto-circuito encontrado em cada disjuntor, dentre as três condições estudadas – curto na barra, na linha e *line out* –, para cada natureza de curto-circuito considerada – monofásica, bifásica e trifásica. E assim, em posse dessas correntes, permite-se analisar a situação dos disjuntores, a partir da capacidade de interrupção simétrica atribuída a eles. No caso, como se observou preliminarmente na análise de superação feita pelo ANAFAS, uma ICCS de 31.5 kA apresenta elevada margem de folga frente aos níveis de curto da subestação, de modo que nenhum dos disjuntores ficou sequer em estado de *Alerta*. Assim, restringe-se a análise para o nível de subestação apenas a uma ICCS de 20 kA, conforme mostra a tabela a seguir.

Tipo o	le curto	FT	3F	FFT	Situação
	D1	16,29	18,21	17,45	Alerta
	D2	11,93	13,49	12,82	ОК
	ID3	16,18	18,21	17,42	Alerta
	D4	16,08	18,21	17,38	Alerta
tor	ID5	16,91	16,96	16,95	ОК
jun	ID6	16,91	16,96	16,95	OK
Dis	D7	17,17	18,36	17,82	Alerta
	D8	16,83	17,41	17,18	OK
	D9	16,76	16,40	17,20	ОК
	D10	17,54	17,93	17,75	OK
	D11	16,83	17,63	17,27	OK

Tabela 6.13 – Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método de dois estágios, para uma ICCS de 20 kA.

6.3.3.6 Análise comparativa

A partir das simulações apresentadas, realizadas através das duas ferramentas empregadas para a análise da superação dos disjuntores por correntes de curto-circuito simétricas para a subestação de João Câmara II - 230 kV, tanto pelo método em dois estágios desenvolvido neste trabalho, cuja abordagem trata-se da subestação em seu nível de seção de barras, quanto aos critérios de análise feitos pelo ONS a partir do ANAFAS, propõe-se analisar os resultados obtidos a fim de se comparar os resultados encontrados.

Os gráficos a seguir mostram o comparativo entre os níveis de correntes de curto-circuito – considerando o estudo de superação – dos disjuntores da subestação, de-terminados a partir das duas abordagens empregadas durante as simulações, e apresentados individualmente para cada tipo de falta analisada.
Figura 6.9 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta monofásica.



Figura 6.10 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta bifásica-terra.



Fase-fase-terra

Figura 6.11 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta trifásica.



Trifásico

Conforme se pode identificar a partir dos valores ilustrados acima, as diferenças mais significativas encontradas, para os três tipos de falta analisados, recaem exclusivamente sobre o disjuntor *D2*, sendo este justamente o disjuntor interligador da subestação. Para os demais disjuntores, os resultados foram exatamente iguais para os dois métodos de estudo, o que deve-se pelo fato do posicionamento adjacentes destes diante a modelagem da subestação, uma vez que suas correntes convergem com os resultados do primeiro estágio. Nesse sentido, observa-se que a análise de superação feita pelo ONS para esses disjuntores, considerando a configuração de SE por barramento duplo, converge para valores precisos e satisfatórios. No entanto, para o disjuntor interligador, as diferenças apontadas nas simulações implicam que há margem para um estudo de cunho mais cuidadoso. Primeiramente, considerando uma capacidade de interrupção simétrica de 20 kA, conforme mostra a tabela a seguir.

	Métod	lo		2 Est	ágios		ANAFAS				
Tipo (de curto	ICCS	FT	3F	FFT	Situação	FT	3F	FFT	Situação	
	ID1	20	16,29	18,21	17,45	Alerta	16,29	18,21	17,45	Alerta	
	ID2	20	11,93	13,49	12,82	OK	17,71	18,36	17,98	Alerta	
	ID3	20	16,18	18,21	17,42	Alerta	16,18	18,21	17,42	Alerta	
	ID4	20	16,08	18,21	17,38	Alerta	16,08	18,21	17,38	Alerta	
đ	ID5	20	16,91	16,96	16,95	OK	16,91	16,96	16,95	OK	
in	ID6	20	16,91	16,96	16,95	OK	16,91	16,96	16,95	OK	
ä	ID7	20	17,17	18,36	17,82	Alerta	17,17	18,36	17,82	Alerta	
	ID8	20	16,83	17,41	17,18	OK	16,83	17,41	17,18	OK	
	ID9	20	16,76	17,48	17,20	OK	16,76	17,48	17,20	OK	
	ID10	20	17,54	17,93	17,75	OK	17,54	17,93	17,75	OK	
	ID11	20	16,83	17,63	17,27	OK	16,83	17,63	17,27	OK	

Tabela 6.14 – Comparação da superação de disjuntores para as duas abordagens de análise.

Na tabela acima nota-se que, assumindo uma ICCS de 20 kA, o disjuntor interligador seria tratado como em estado de *Alerta*, uma vez que seu nível de curto-circuito trifásico apresenta relação ICC/ICCS superior a 90%. No entanto, verificando os resultados obtidos através da modelagem no nível de subestação, através do método em dois estágios, este disjuntor seria tratado como OK, uma vez que suas relações ICC/ICCS mal atingem o valor de 70%. Nesse sentido, pode-se considerar uma situação factual em que um disjuntor em estado de *Alerta* seja desnecessariamente substituído por outro de maior capacidade, em geral, de custo mais elevado, carecendo de mão-de-obra e manobras operacionais para sua instalação, quando na realidade, o disjuntor instalado poderia continuar atuando.

Vale ressaltar também a estreita relação das correntes de curto-circuito do disjuntor interligador em relação ao balanceamento de cargas sobre os barramentos da subestação, conforme foi discutido na Subseção 6.3.2. A configuração empregada para as simulações da análise de superação realizadas até aqui não foi o caso ótimo de seccionamento dos disjuntores, no entanto, ainda assim pode-se observar um certo equilíbrio de cargas nas Tabelas 6.5 e 6.6, considerando a corrente sobre o interligador sob a aplicação de faltas em ambos os barramentos da SE, e assim, pode-se presumir que os resultados encontrados para a superação do interligador destoaria pouco se a análise fosse feita partindo-se do caso ótimo. Se assumíssemos uma configuração que apresentasse elevado grau de assimetria em relação ao balanço de cargas, os níveis de superação de curto-circuito para o disjuntor interligador seriam certamente superiores.

Verifica-se então que a aproximação assumida pelo ONS é uma atribuição conservadora, uma vez que admite-se o pior caso encontrado ao disjuntor interligador, que aconteceria considerando-se o desbalanceamento máximo entre os barramentos da subestação. Entretanto, conforme já demonstrado e discutido, níveis inferiores de correntes de curto-circuito para análise de superação de disjuntores podem ser alcançados, considerando uma distribuição inteligente das cargas conectadas à SE.

6.3.4 Expansão do parque gerador

Figura 6.12 – Modelagem no nível de seção de barras para a SE de João Câmara II - 230kV, com a inclusão do novo circuito vindo da barra 48743.



Para a análise da subestação representada acima, será considerado um novo sistema elétrico, que está apresentado no Anexo B deste trabalho. Essa rede trata-se de uma expectativa de expansão do sistema anterior, prevista para o ano de 2023 (horizonte de quatro anos no planejamento). A rede passa então a apresentar 73 barras, 127 circuitos (LTs), 49 transformadores e 17 complexos de geração eólica.

Nesse novo cenário, a subestação de João Câmara II - 230 kV (barra n° 8477) apresenta a mesma topologia da anterior, sendo um barramento duplo com disjuntor interligador, mas sua configuração se altera com a inserção do complexo eólico de Aventura - barra n°48743, cuja injeção de potência é anexada aos seus barramentos.

Para validação do método em dois estágios a partir do novo caso de estudo, primeiramente será aplicado um curto-circuito monofásico na fase A sobre o barramento identificado como nó n^o 1 da subestação de João Câmara II. As correntes de contribuição da subestação do primeiro estágio estão representadas pela setas vermelhas na Figura 6.13. Dessa forma, após inseridos os dados de entrada, o programa desenvolvido então retorna o resultado referente ao segundo estágio, sendo que o sistema linear construído, já na forma reduzida e escalonada, está apresentado na Equação (6.3).



Figura 6.13 – Curto-circuito monofásico ocorrido na SE de João Câmara II - 230 kV. Correntes em ampères.

_												-	-		-		-	
	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D1}		$1673.4/-89.1^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		\dot{I}_{D2}		$1001.7 / -87.3^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D3}		$702.16/-87.4^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		\dot{I}_{D4}		$261.54 / -89.9^{\circ}$		
	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D5}		$1849.6 / -88.9^{\circ}$		
	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	~	\dot{I}_{D6}	_	$10984/+93.5^{\circ}$		(6.3)
	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D7}	_	$1763.4/-89.1^{\circ}$		(0.3)
	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0		\dot{I}_{D8}		$2012.8/-82.8^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		\dot{I}_{D9}		$2004.8 / -82.5^{\circ}$		
	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D10}		$4639.1/-87.0^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		\dot{I}_{D11}		$4639.1/-87.0^{\circ}$		
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		\dot{I}_{D12}		970.30 <u>/-87.1°</u>		
												_						

A partir do sistema acima, se é possível obter os valores das correntes dos disjuntores para a nova configuração da subestação de João Câmara II. Os resultados estão mostrados na tabela a seguir.

Tabela 6.15 – Correntes sobre os disjuntores da SE de João Câmara II - 230 kV, calculadas aplicando-se o método em dois estágios, para uma falta monofásica no nó de nº 1 da SE. Correntes em ampères.

Disjuntor	Falta monofásica
\dot{I}_{D1}	$1673.4 / -89.1^{\circ}$
I_{D2}	$10984 / +93.5^{\circ}$
I_{D3}	$1763.4 / -89.1^{\circ}$
I_{D4}	$1849.6 / -88.9^{\circ}$
I_{D5}	$4639.1 / -87.0^{\circ}$
I_{D6}	$4639.1 \ /-87.0^{\circ}$
I_{D7}	$702.16 / -87.4^{\circ}$
I_{D8}	$2004.8 \ /-82.5^{\circ}$
I_{D9}	$2012.8 / -82.8^{\circ}$
I_{D10}	$261.54 / -89.9^{\circ}$
I_{D11}	$1001.7 / -87.3^{\circ}$
I_{D12}	970.30 <u>/-87.1°</u>

6.3.5 Balanço de carga (após a expansão)





Para realizar o balanceamento das cargas sobre os barramentos da subestação de João Câmara II, considerando as novas contribuições de corrente de falta sob o contexto da expansão da rede, será novamente aplicado o estudo de otimização linear descrito na Subseção 6.3.2.

A entrada de dados referente ao problema de otimização, inserida no editor do GNU Octave, é apresentada na sequência.

Figura 6.15 – Entrada de dados no GNU Octave para solução do P.O.L.

```
# Correntes de contribuição [A]
I1 = 608.23; I3 = 610.01;
I4 = 611.77; I5 = 7433.4;
I6 = 7433.4; I7 = 0.0;
I8 = 2559.2; I9 = 2391.8;
I10 = 432.31; I11 = 739.41;
I12 = 619.52;
# Coeficientes da função objetivo
c = [I1 -I1 I3 -I3 I4 -I4 I5 -I5 I6 -I6 I7 -I7 I8 -I8 I9 -I9 I10 -I10 I11 -I11 I12 -I12]
# Coeficientes das restrições
0011000000000000000000;
    0 0:
    0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0
                                   0 0;
    00000000000000000110000;
    000000000000000000001100;
    0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1;
    I1 -I1 I3 -I3 I4 -I4 I5 -I5 I6 -I6 I7 -I7 I8 -I8 I9 -I9 I10 -I10 I11 -I11 I12 -I12]
# Valores das restrições Ax = b | Ax >= b
b = [1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 0]
ib = zeros(1,22) # Limite inferior
ub = ones(1,22) # Limite superior
s = 1 # Problema de minimização
ctype = "SSSSSSSSSSL" # Tipo de restrição (na ordem) (S p/ =) e (L p/ >=)
vartype = "IIIIIIIIIIIIIIIIIII" # Tipo de variáveis (I p/ inteiras)
[x,z] = glpk(c, A, b, ib, ub, ctype, vartype, s)
```

Fonte: Os autores.

Executando os comandos acima e compilando-os no GNU Octave, obtém-se a seguinte solução ótima do sistema:

Com esses dados, torna-se possível realizar o seccionamento dos disjuntores de modo a obter o caso ótimo de balanceamento de cargas sobre os barramentos da subestação, uma vez que o valor ótimo encontrado é o menor desvio entre as injeções de cada barramento. A figura a seguir mostra a subestação com os disjuntores seccionados na condição ótima de balanço de cargas da SE.





A fim de determinar a corrente sobre o interligador, será aplicado um curto-circuito trifásico nos barramentos principais da subestação $8477 - nós n^{\circ} 1 e 13 -$, de modo a verificar o desvio entre os valores eficazes das correntes incidentes sobre cada barramento. Os resultados estão apresentados abaixo.

$$\dot{I}_{D2}^{c.c.\to1} = 11663/93.0^{\circ}A$$
$$\dot{I}_{D2}^{c.c.\to13} = 11769/-86.8^{\circ}A$$
$$I_{D2}^{c.c.\to13} - I_{D2}^{c.c.\to1} = 105.28A$$

Recordando que a diferença do valor encontrado frente ao desvio ótimo deve-se à aproximação utilizada, ao considerar apenas os módulos das correntes de contribuição na formulação do P.O.L. Contudo, ao analisarmos as correntes no interligador, é possível verificar que os valores estão similares, demonstrando que a melhor condição de equilíbrio entre as injeções de corrente nos barramentos foi alcançada.

6.3.6 Superação de disjuntores (após a expansão)

Para análise de superação dos disjuntores por correntes de curto-circuito simétricas na subestação de João Câmara II, retratada na Figura 6.12, sob o contexto da expansão da rede, serão primeiramente apresentados os resultados referentes ao relatório gerado no programa ANAFAS. A análise apresentada no relatório segue as diretrizes do ONS, uma vez que para se verificar a superação dos disjuntores, o programa aplica três condições de falta (na barra, na linha e *line-out*) para os curto-circuitos monofásico, fase-fase-terra e trifásico, totalizando nove simulações por circuito conectado à subestação.

Como o programa ANAFAS analisa a subestação pela modelagem barra-ramo da rede, não se é possível obter diretamente as correntes de curto-circuito no nível de seção de barras, e nesse sentido, os dados adquiridos no programa para as três condições de falta no primeiro estágio são usados para implementar na entrada de dados do método em dois estágios, a fim de possibilitar a análise de superação sobre todos os disjuntores da SE. Os resultados obtidos no ANAFAS e pelo método em dois estágios serão comparados ao final dessa subseção.

6.3.6.1 Análise de superação através do ANAFAS

Assumindo valores hipotéticos de 20, 25, 31.5 e 40 kA para a capacidade de interrupção simétrica nominal dos disjuntores da SE, são obtidos os resultados apresentados nas Tabelas 6.16, 6.17, 6.18 e 6.19, respectivamente.

Parra			ICC [kA]		Rela	ição ICC/ICCS	s [%]	Situação
Dalla	ICCS [KA]	FT	FFT	3F	FT	FFT	3F	Situação
48350	20	20,40	22,69	21,74	102	113	109	Superado
48348	20	20,70	23,43	22,32	104	117	112	Superado
48111	20	21,16	23,00	22,23	106	115	111	Superado
8478/1	20	19,61	23,28	21,96	98	116	110	Superado
8478/2	20	19,48	23,28	21,92	97	116	110	Superado
7353	20	19,56	23,28	21,88	98	116	109	Superado
8653	20	20,08	22,14	21,28	100	111	106	Superado
8607	20	20,15	22 <mark>,</mark> 03	21,23	101	110	106	Superado
48236/1	20	20,04	21,07	20,61	100	105	103	Superado
48236/2	20	20,04	21,07	20,61	100	105	103	Superado
48743	20	20,43	22,81	21,82	102	114	109	Superado
Interligador	20	21,16	23,43	22,32	106	117	112	Superado

Tabela 6.16 – Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de interrupção simétrica de 20 kA.

Tabela 6.17 – Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de interrupção simétrica de 25 kA.

Parra			ICC [kA]		Rela	ição ICC/ICCS	5 [%]	Situação
Ddird	ICCS [KA]	FT	FFT	3F	FT	FFT	3F	Situação
48350	25	20,40	22,69	21,74	82	90,8	87,0	Alerta
48348	25	20,70	23,43	22,32	83	93,7	89,3	Alerta
48111	25	21,16	23,00	22,23	85	92,0	88,9	Alerta
8478/1	25	19,61	23,28	21,96	78	93,1	87,8	Alerta
8478/2	25	19,48	23,28	21,92	78	93,1	87,7	Alerta
7353	25	19,56	23,28	21,88	78	93,1	87,5	Alerta
8653	25	20,08	22,14	21,28	80	88,6	85,1	ОК
8607	25	20,15	22,03	21,23	81	88,1	84,9	OK
48236/1	25	20,04	21,07	20,61	80	84,3	82,4	OK
48236/2	25	20,04	21,07	20,61	80	84,3	82,4	OK
48743	25	20,43	22,81	21,82	82	91,2	87,3	Alerta
Interligador	25	21,16	23,43	22,32	85	93,7	89,3	Alerta

Tabela 6.18 – Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de interrupção simétrica de 31.5 kA.

Parra			ICC [kA]		Rela	ação ICC/ICCS	[%]	Situação
Dalla	ICCS [KA]	FT	FFT	3F	FT	FFT	3F	Situação
48350	31,5	20,40	22,69	21,74	65	72,0	69,0	ОК
48348	31,5	20,70	23,43	22,32	66	74,4	70,9	ОК
48111	31,5	21,16	23,00	22,23	67	73,0	70,6	ОК
8478/1	31,5	19,61	23,28	21,96	62	73,9	69,7	ОК
8478/2	31,5	19,48	23,28	21,92	62	73,9	69,6	ОК
7353	31,5	19,56	23,28	21,88	62	73,9	69,5	OK
8653	31,5	20,08	22,14	21,28	64	70,3	67,6	ОК
8607	31,5	20,15	22,03	21,23	64	69,9	67,4	ОК
48236/1	31,5	20,04	21,07	20,61	64	66,9	65,4	ОК
48236/2	31,5	20,04	21,07	20,61	64	66,9	65,4	ОК
48743	31,5	20,43	22,81	21,82	65	72,4	69,3	OK
Interligador	31,5	21,16	23,43	22,32	67	74,4	70,9	OK

Parra			ICC [kA]		Rela	ição ICC/ICCS	[%]	Situação	
Darra		FT	FFT	3F	FT	FFT	3F	Situação	
48350	40	20,40	22,69	21,74	51	56,7	54,4	ОК	
48348	40	20,70	23,43	22,32	52	58,6	55,8	ОК	
48111	40	21,16	23,00	22,23	53	57,5	55,6	ОК	
8478/1	40	19,61	23,28	21,96	49	58,2	54,9	ОК	
8478/2	40	19,48	23,28	21,92	49	58,2	54,8	ОК	
7353	40	19,56	23,28	21,88	49	58,2	54,7	ОК	
8653	40	20,08	22,14	21,28	50	55,4	53,2	ОК	
8607	40	20,15	22,03	21,23	50	55,1	53,1	ОК	
48236/1	40	20,04	21,07	20,61	50	52,7	51,5	ОК	
48236/2	40	20,04	21,07	20,61	50	52,7	51,5	ОК	
48743	40	20,43	22,81	21,82	51	57,0	54,6	OK	
Interligador	40	21,16	23,43	22,32	53	58,6	55,8	ОК	

Tabela 6.19 – Níveis de curto-circuito na SE 8477 expandida para uma capacidade de interrupção simétrica de 40 kA.

Lembrando que a corrente de curto-circuito atribuída ao disjuntor interligador, assumida pelo ONS, trata-se do maior valor dentre os disjuntores adjacentes da subestação. Nessa subestação, as maiores correntes de curto-circuito encontradas estão no circuito que interliga a barra n° 48111 à SE de João Câmara II, para as faltas monofásica e trifásica; e no circuito que interliga a barra n° 48348 à SE para a falta bifásica-terra.

Para uma ICCS de 20 kA, segundo o relatório de superação de disjuntores do ANAFAS, todos os disjuntores da subestação são considerados *Superados*, dado que as correntes passantes por estes dispositivos ultrapassam 100% de sua capacidade de interrupção simétrica nominal.

Dessa forma, foi efetuada uma nova análise supondo-se uma ICCS de 25 kA. Sob essa capacidade de interrupção, verificou-se que os disjuntores dos circuitos referentes às barras 48350, 48348, 48111, 8478/1, 8478/2, 7353, 48743 e do interligador ficam em estado de alerta. Para que o disjuntor deixe essa condição, a análise foi refeita para uma ICCS de 31.5 kA. Para essa capacidade de interrupção, os disjuntores passam a ser classificados como OK, uma vez que suas relações ICC/ICCS são inferiores a 90%. No entanto, ainda não atendem os requisitos do ONS para que não seja necessário investigar o TRT e o X/R.

Nesse sentido, analisando-se novamente as condições de superação dos disjuntores da subestação, agora assumindo uma ICCS de 40 kA, todos os disjuntores passam a ser classificados como OK sob essa condição, e ainda, suas relações da corrente de curtocircuito pela capacidade de interrupção mostraram-se inferiores a 70%, o que implicaria em uma circunstância mais adequada do ponto de vista técnico e operacional, uma vez que, de acordo com o ONS, essa condição seria suficiente para assumir a regularidade do equipamento, dispensando assim demais análises e investigações.

6.3.6.2 Dois estágios - Curto-circuito na barra

Na modelagem no nível de seção de barras, é possível verificar que a subestação analisada possui topologia de barramento duplo, e por isso foram simuladas duas ocorrências de falta na barra. As faltas foram aplicadas nos nós 1 e 13 da SE, e os resultados apresentados em módulo — referem-se às fases das correntes de falta mais elevadas no disjuntor nas condições de curto-circuito monofásico, bifásico-terra e trifásico na barra, estando mostradas nas Tabelas 6.20 e 6.21. Comparando-se as correntes de curto-circuito nos dois nós, observa-se que elas se diferem apenas no disjuntor interligador da subestação.

Tabela 6.20 – Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó n^o 1 da SE 8477 expandida no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em ampères.

Tip	oo de curto	FT	FFT	3F
	ID1	1673,4	1389,5	608,23
	ID2	10984	11491	11791
б	ID3	1763,4	1466,8	610,01
	ID4	1849,6	1541,6	611,77
	ID5	4639,1	6540,7	7433,4
Ĭ	ID6	4639,1	6540,7	7433,4
DI3	ID7	702,16	646,21	0,00
ă	ID8	2004,8	2405,5	2559,2
	ID9	2012,8	2296,3	2391,8
	ID10	261,54	379,17	432,31
	ID11	1001,7	906,31	739,41
	ID12	970,30	852,50	619,52

Tabela 6.21 – Correntes para as faltas FT, FFT e 3F, ocorridas no nó n^o 13 da SE 8477 expandida no nível de seção de barras. Correntes em módulo e em ampères.

Tip	o de curto	FT	FFT	3F
	ID1	1673,4	1389,5	608,23
	ID2	10321	11072	11641
NTOR	ID3	1763,4	1466,8	610,01
	ID4	1849,6	1541,6	611,77
	ID5	4639,1	6540,7	7433,4
	ID6	4639,1	6540,7	7433,4
DIS I	ID7	702,16	646,21	0,00
ă	ID8	2004,8	2405,5	2559,2
	ID9	2012,8	2296,3	2391,8
	ID10	261,54	379,17	432,31
	ID11	1001,7	906,31	739,41
	ID12	970,30	852,50	619,52

6.3.6.3 Dois estágios - Curto-circuito na linha

Na condição de curto-circuito na linha, é atribuído ao nó da SE em que a LT de curto está conectada como sendo o local da falta, assumindo a esse ponto o valor de curto da barra calculado no primeiro estágio. Novamente, são aplicadas três tipos de falta, monofásica, bifásica-terra e trifásica, para cada linha. Os resultados do módulo da corrente da fase mais elevada para cada disjuntor estão evidenciados nas Tabelas 6.22, 6.23 e 6.24. Na última coluna das tabelas, estão as informações mais relevantes do estudo de superação de disjuntores, pois destacam as maiores correntes de curto-circuito, em módulo, de cada disjuntor para a condição de curto-circuito na linha.

a) Falta monofásica

Tabela 6.22 – Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica nas LTs da SE, em módulo e em ampères.

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	ID1	1673,4	19731,9	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	1673,4	19732
	ID2	10984	10984	10420	10984	10420	10984	10420	10984	10420	10420	10420	10984
	Ірз	1763,4	1763,4	19642	1763,4	1763,4	1763,4	1763,4	1763,4	1763,4	1763,4	1763,4	19642
	ID4	19556	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	1849,6	19556
5	los	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	16765	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	16765
Ĕ	ID6	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	4639,1	16765	4639,1	4639,1	4639,1	16765
isju	lo7	702,16	702,16	702,16	702,16	702,16	702,16	702,16	702,16	20702	702,16	702,16	20702
	los	2004,8	2004,8	2004,8	19405	2004,8	2004,8	2004,8	2004,8	2004,8	2004,8	2004,8	19405
	los	2012,8	2012,8	2012,8	2012,8	19396	2012,8	2012,8	2012,8	2012,8	2012,8	2012,8	19396
	D10	261,54	261,54	261,54	261,54	261,54	21143	261,54	261,54	261,54	261,54	261,54	21143
	ID11	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	1001,7	20402	1001,7	20402
	ID12	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	970,30	20433	20433

b) Falta bifásica-terra

Tabela 6.23 – Correntes de curto-circuito para uma falta bifásica-terra nas LTs da SE, em módulo e em ampères.

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	D1	1389,5	21618	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	1389,5	21618
	ID2	11491	11491	11135	11491	11135	11491	11135	11491	11135	11135	11135	11491
	ID3	1466,8	1466,8	21586	1466,8	1466,8	1466,8	1466,8	1466,8	1466,8	1466,8	1466,8	21586
	ID4	21552	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	1541,6	21552
5	ID5	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	16393	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	16393
Ĕ	ID6	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	6540,7	16393	6540,7	6540,7	6540,7	16393
isju	ID7	646,21	646,21	646,21	646,21	646,21	646,21	646,21	646,21	22325	646,21	646,21	22325
	ID8	2405,5	2405,5	2405,5	20239	2405,5	2405,5	2405,5	2405,5	2405,5	2405,5	2405,5	20239
	ID9	2296,3	2296,3	2296,3	2296,3	20340	2296,3	2296,3	2296,3	2296,3	2296,3	2296,3	20340
	ID10	379,17	379,17	379,17	379,17	379,17	22226	379,17	379,17	379,17	379,17	379,17	22226
	ID11	906,31	906,31	906,31	906,31	906,31	906,31	906,31	906,31	906,31	21738	906,31	21738
	D12	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	852,50	21822	21822

c) Falta trifásica

Tabela 6.24 – Correntes de curto-circuito	para	uma	falta	trifásica	nas	LTs	da	SE,	em
módulo e em ampères.									

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	D1	608,23	22824	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	22824
	ID2	11791	11791	11641	11791	11641	11791	11641	11791	11641	11641	11641	11791
	DЗ	610,01	610,01	22822,41	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	22822
	D4	22821	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	22821
5	los	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	15999	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	15999
Ĕ	ID6	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	7433,4	15999	7433,4	7433,4	7433,4	15999
isju	D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23432	0,00	0,00	23432
	ID8	2559,2	2559,2	2559,2	20875	2559,2	2559,2	2559,2	2559,2	2559,2	2559,2	2559,2	20875
	lD9	2391,8	2391,8	2391,8	2391,8	21041,9	2391,8	2391,8	2391,8	2391,8	2391,8	2391,8	21042
	D10	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	23000	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	23000
	D11	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	22693	739,41	22693
	D12	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	22813	22813

6.3.6.4 Dois estágios - Curto-circuito de line out

Na condição de falta de *line out*, considera-se as mesmas premissas da ocorrência de uma falta na linha, porém a linha em análise passa a estar fora de operação. Os resultados das simulações para o curto-circuito monofásico, bifásico-terra e trifásico, considerando as quedas de cada linha, são mostrados pelo módulo da corrente da fase mais elevada para cada disjuntor, conforme exposto nas Tabelas 6.25, 6.26 e 6.27.

a) Falta monofásica

Tabela 6.25 – Correntes de curto-circuito para uma falta monofásica de *line out* da SE, em módulo e em ampères.

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	D1	1948,2	19611	1938,5	1669,6	1683,7	1661,5	1606,2	1606,2	1741,4	1705,5	1713,0	19611
	D2	10997	11013	8967,2	11540	9146,1	10993	6321,7	14245	10186	9950,0	9970,7	14245
	ID3	2050,9	2029,6	19479	1759,2	1774,4	1750,4	1690,6	1690,6	1836,9	1798,0	1806,2	19479
	ID4	19349	2126,5	2138,1	1845,1	1861,5	1835,7	1771,5	1771,5	1928,6	1886,9	1895,6	19349
1	ID5	4247,3	4300,6	4273,6	4839,2	4785,8	4670,5	20036	7923,5	4461,0	4555,1	4535,3	20036
Ĕ	ID6	4247,3	4300,6	4273,6	4839,2	4785,8	4670,5	7923,5	20036	4461,0	4555,1	4535,3	20036
isju	ID7	800,63	787,23	794,01	699,60	708,89	694,25	657,83	657,83	20528	723,24	728,24	20528
	ID8	1927,8	1938,3	1933,0	20154	2357,5	2010,9	2148,5	2148,5	1969,6	1988,0	1984,1	20154
	ID9	1960,4	1967,6	1964,0	2379,1	20084	2017,0	2138,4	2138,4	1988,8	2001,3	1998,7	20084
	D10	237,62	240,88	239,22	262,17	259,91	21163	272,33	272,33	250,67	256,42	255,21	21163
	D11	1038,7	1033,7	1036,2	1000,6	1004,1	998,74	985,09	985,09	1018,5	19085	1011,4	19085
	D12	1019,7	1013,0	1016,4	968 <mark>,</mark> 92	973,54	966,36	948,08	948,08	992,72	980,84	20345	20345

b) Falta bifásica-terra

Tabela 6.26 – Correntes de curto-circuito	para uma	a falta bifásica	a-terra de	line	out	da S	ьЕ,
em módulo e em ampères.							

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	ID1	1948,2	19611	1938,5	1669,6	1683,7	1661,5	1606,2	1606,2	1741,4	1705,5	1713,0	19611
	ID2	10997	11013	8967,2	11540	9146,1	10993	6321,7	14245	10186	9950,0	9970,7	14245
	Ірз	2050,9	2029,6	19479	1759,2	1774,4	1750,4	1690,6	1690,6	1836,9	1798,0	1806,2	19479
	ID4	19349	2126,5	2138,1	1845,1	1861,5	1835,7	1771,5	1771,5	1928,6	1886,9	1895,6	19349
1	ID5	4247,3	4300,6	4273,6	4839,2	4785,8	4670,5	20036	7923,5	4461,0	4555,1	4535,3	20036
Ĕ	ID6	4247,3	4300,6	4273,6	4839,2	4785,8	4670,5	7923,5	20036	4461,0	4555,1	4535,3	20036
isju	ld7	800,63	787,23	794,01	699,60	708,89	694,25	657,83	657,83	20528	723,24	728,24	20528
	ID8	1927,8	1938,3	1933,0	20154	2357,5	2010,9	2148,5	2148,5	1969,6	1988,0	1984,1	20154
	lD9	1960,4	1967,6	1964,0	2379,1	20084	2017,0	2138,4	2138,4	1988,8	2001,3	1998,7	20084
	D10	237,62	240,88	239,22	262,17	259,91	21163	272,33	272,33	250,67	256,42	255,21	21163
	D11	1038,7	1033,7	1036,2	1000,6	1004,1	998,74	985,09	985,09	1018,5	19085	1011,4	19085
	D12	1019.7	1013.0	1016.4	968.92	973.54	966,36	948.08	948.08	992.72	980.84	20345	20345

c) Falta trifásica

Tabela 6.27 – Correntes de curto-circuito para uma falta trifásica de *line out* da SE, em módulo e em ampères.

	LT curto	7353	8478/1	8478/2	8607	8653	48111	48236/1	48236/2	48348	48350	48743	Máx
	D1	836,38	23279	835,48	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	608,23	23279
	D2	12020	12018	11181	12640	9684,0	11791	4519,4	16694	11791	11052	11172	16694
	D3	838,82	837,01	23278	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	610,01	23278
	D4	23277	839,42	840,32	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	611,77	23277
1	D5	7433,4	7433,4	7433,4	7740,5	7716,2	7433,4	21075	12174	7433,4	7433,4	7433,4	21075
Ĕ	ID6	7433,4	7433,4	7433,4	7740,5	7716,2	7433,4	12174	21075	7433,4	7433,4	7433,4	21075
isju	D7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23432	0,00	0,00	23432
	D8	2559,2	2559,2	2559,2	22031	3094,2	2559,2	2732,2	2732,2	2559,2	2559,2	2559,2	22031
	D9	2391,8	2391,8	2391,8	2934,6	22141	2391,8	2553,4	2553,4	2391,8	2391,8	2391,8	22141
	D10	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	23000	432,31	432,31	432,31	432,31	432,31	23000
	ID11	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	739,41	22693	739,41	22693
	D12	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	619,52	22813	22813

6.3.6.5 Análise de superação através do método em dois estágios

Na análise de superação realizada pelo programa ANAFAS, constatou-se que para uma ICCS de 31.5 kA e 40 kA, todos os disjuntores são avaliados como OK; para uma ICCS de 25 kA, existem disjuntores em estado de *Alerta*; e para ICCS de 20 kA, todos os disjuntores são avaliados como *Superados*. Por isso, será feita a análise de superação para uma ICCS de 20 kA e de 25 kA, conforme mostra as Tabelas 6.28 e a 6.29.

Tipo d	le curto	FT	3F	FFT	Situação
	ID1	19,73	23,28	21,96	Superado
	ID2	14,25	16,69	15,69	OK
	ID3	19,64	23,28	21,92	Superado
	ID4	19,56	23,28	21,88	Superado
۲	ID5	20,04	21,07	20,61	Superado
Itt	ID6	20,04	21,07	20,61	Superado
isju	ID7	20,70	23,43	22,32	Superado
Δ	ID8	20,15	22,03	21,21	Superado
	ID9	20,08	22,14	21,28	Superado
	ID10	21,16	23,00	22,23	Superado
	ID11	20,40	22,69	21,74	Superado
	ID12	20,43	22,81	21,82	Superado

Tabela 6.28 – Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método em dois estágios, para uma ICCS de 20 kA.

Tabela 6.29 – Análise da superação de disjuntores para a SE estudada, pelo método em dois estágios, para uma ICCS de 25 kA.

Tipo d	le curto	FT	3F	FFT	Situação
	ID1	19,73	23,28	21,96	Alerta
	ID2	14,25	16,69	15,69	ОК
	ID3	19,64	23,28	21,92	Alerta
	ID4	19,56	23,28	21,88	Alerta
5	ID5	20,04	21,07	20,61	ОК
T T	ID6	20,04	21,07	20,61	ОК
isju	ID7	20,70	23,43	22,32	Alerta
	ID8	20,15	22,03	21,21	OK
	ID9	20,08	22,14	21,28	ОК
	ID10	21,16	23,00	22,23	Alerta
	ID11	20,40	22,69	21,74	Alerta
	ID12	20,43	22,81	21,82	Alerta

6.3.6.6 Análise comparativa

Os gráficos comparativos das simulações realizadas pelo ANAFAS e pelo método em dois estágios para cada tipo de falta, entre os níveis de corrente de curto-circuito nos disjuntores da SE, considerando o estudo de superação para ICCS de 20 kA, são apresentados na sequência.

Figura 6.17 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta monofásica.



Figura 6.18 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta bifásica-terra.



Fase-fase-terra

Figura 6.19 – Gráfico comparativo entre as duas abordagens de análise de superação de disjuntores, sob condição de falta trifásica.



Nos gráficos acima, é possível observar discrepâncias entre os dois métodos de análise nas correntes de curto-circuito para o caso do disjuntor D2. Esse disjuntor representa o interligador da subestação e isso ocorre para os três tipos de falta. Nos outros disjuntores, os resultados encontrados foram iguais, uma vez que as correntes calculadas pelo segundo estágio convergem com aquelas determinadas no primeiro (disjuntores adjacentes à SE).

Portanto, a análise de superação de disjuntores feita pelo ONS no barramento duplo é válida, uma vez que os resultados analisados no primeiro e segundo estágio são os mesmos. Contudo, quando existe um disjuntor interligador na SE, as diferenças na corrente de curto-circuito são significativas. Na Tabela 6.30 e na Tabela 6.31, são comparadas situação dos disjuntores para uma ICCS de 20 kA e de 25 kA, respectivamente.

Os gráficos para uma capacidade de interrupção simétrica de 25 kA apresentaram as mesmas características das comparações realizadas para ICCS de 20 kA, ou seja, ocorreram diferenças significativas na corrente de curto-circuito no disjuntor interligador, considerando-se os três tipos de falta.

	Métod	do		2 Esta	ágios		ANAFAS				
Tipo (de curto	ICCS	FT	3F	FFT	Situação	FT	3F	FFT	Situação	
	ID1	20	19,73	23,28	21,96	Superado	19,61	23,28	21,96	Superado	
	ID2	20	14,25	16,69	15,69	ОК	21,32	23,43	22,47	Superado	
	ID3	20	19,64	23,28	21,92	Superado	19,48	23,28	21,92	Superado	
	ID4	20	19,56	23,28	21,88	Superado	19,56	23,28	21,88	Superado	
5	ID5	20	20,04	21,07	20,61	Superado	20,04	21,07	20,61	Superado	
Ĕ	ID6	20	20,04	21,07	20,61	Superado	20,04	21,07	20,61	Superado	
isj.	ID7	20	20,70	23,43	22,32	Superado	20,70	23,43	22,32	Superado	
	ID8	20	20,15	22,03	21,21	Superado	20,15	22,03	21,23	Superado	
	ID9	20	20,08	22,14	21,28	Superado	20,08	22,14	21,28	Superado	
	ID10	20	21,16	23,00	22,23	Superado	21,16	23,00	22,23	Superado	
	ID11	20	20,40	22,69	21,74	Superado	20,40	22,69	21,74	Superado	
	ID12	20	20,43	22,81	21,82	Superado	20,43	22,81	21,82	Superado	

Tabela 6.30 – Comparação da superação de disjuntores das duas abordagens de análise para ICCS de 20 kA.

Tabela 6.31 – Comparação da superação de disjuntores das duas abordagens de análise para ICCS de 25 kA.

	Métod	lo		2 Est	ágios			ANA	FAS	
Tipo (de curto	ICCS	FT	3F	FFT	Situação	FT	3F	FFT	Situação
	ID1	25	19,73	23,28	21,96	Alerta	19,61	23,28	21,96	Alerta
	ID2	25	14,25	16,69	15,69	OK	21,16	23,43	22,32	Alerta
	ID3	25	19,64	23,28	21,92	Alerta	19,48	23,28	21,92	Alerta
	ID4	25	19,56	23,28	21,88	Alerta	19,56	23,28	21,88	Alerta
5	ID5	25	20,04	21,07	20,61	OK	20,04	21,07	20,61	OK
T T	ID6	25	20,04	21,07	20,61	OK	20,04	21,07	20,61	OK
isje	ID7	25	20,70	23,43	22,32	Alerta	20,70	23,43	22,32	Alerta
	ID8	25	20,15	22,03	21,21	OK	20,15	22,03	21,23	OK
	ID9	25	20,08	22,14	21,28	OK	20,08	22,14	21,28	OK
	ID10	25	21,16	23,00	22,23	Alerta	21,16	23,00	22,23	Alerta
	ID11	25	20,40	22,69	21,74	Alerta	20,40	22,69	21,74	Alerta
	ID12	25	20,43	22,81	21,82	Alerta	20,43	22,81	21,82	Alerta

Analisando o disjuntor D2 na Tabela 6.30, consta-se que este estava Superado na análise do ONS, porém na análise pelo método em dois estágios, o disjuntor é classificado como OK. Quando a ICCS passa a ser de 25 kA, o disjuntor é classificado como Alerta pela análise do ANAFAS, enquanto na análise pelo nível de seção de barras, resulta que, para aquela configuração da SE, o disjuntor é tratado como em estado OK.

A análise empregada e os resultados encontrados para o nível de seção de barras da SE, deve-se a uma configuração de subestação pré-estabelecida, ou seja, ao modificar o balanceamento das cargas nos barramentos da SE, as correntes de curto-circuito no disjuntor interligador se alteram. Para os casos em que a assimetria no balanço de cargas fosse grande, a corrente de curto-circuito no disjuntor interligador seria maior. No que concerne ao disjuntor interligador, a análise realizada pelo ONS também mostrou-se válida, uma vez que atribui a ele o pior caso de corrente de curto-circuito, sendo portanto uma convenção conservadora. Porém, conforme já discutido, existem maneiras de balancear as cargas nos barramentos da SE, de modo que proporcionem economia em caso substituição desnecessária de disjuntores *Superados* ou em *Alerta*.

6.4 Análise comparativa entre a SE de João Câmara II e sua expansão

A Tabela 6.32 mostra a comparação dos casos de estudo da subestação de João Câmara II, antes e depois da expansão do sistema (anos de 2019 e 2023), para as condições de falta monofásica e trifásica no nó n° 1 da subestação.

Tabela 6.32 – Comparação entre a SE de João Câmara II antes e após sua expansão, sob condição de falta monofásica e trifásica no nó n°1.

Falt	a na barra	João Câmara II	João Câmara II (Expansão)	João Câmara II	João Câmara II (Expansão)
	a na sana	Ealta ma	(Expansao)	Ealta t	(Expansao)
		Faita Ilio	norasica	Faila li	Itasica
	ID1	1575,7	1673,4	608,23	608,23
	ID2	8708,5	10984	8962,2	11791
	Ірз	1657,5	1763,4	610,01	610,01
	ID4	1736,0	1849,6	611,77	611,77
r	los	3753,9	4639,1	5646,5	7433,4
Into	ID6	3753,9	4639,1	5646,5	7433,4
isju	ld7	637,72	702,16	0,00	0,00
	ID8	1767,5	2004,8	2107,0	2559,2
	lD9	1778,0	2012,8	1968,2	2391,8
-	ID10	277,23	261,54	432,31	432,31
	ID11	977,53	1001,7	739,41	739,41
	ID12	-	970,30	-	619,52

Analisando a tabela, observa-se que na ocorrência de uma falta monofásica na SE sob a rede expandida, houve o aumento do módulo da corrente de curto-circuito em todos os disjuntores, à exceção do disjuntor *D10*. O disjuntor mais afetado pela expansão dos sistema foi o *D2*, correspondente ao interligador, uma vez que sua corrente de curto-circuito aumentou 26.1%. Os disjuntores *D5* e *D6*, que estão conectados nos circuitos referentes à barra de João Câmara III n° 48236, também apresentaram uma elevação significativa nos níveis de curto-circuito, com elevação percentual de cerca de 23%. Essa barra representa um equivalente do sistema, e o aumento das correntes de contribuição de curto-circuito indica que também houve uma ampliação da capacidade instalada nesse subsistema.

Na condição de curto-circuito trifásico na barra, verificou-se que algumas das correntes passantes nos disjuntores permaneceram iguais na ampliação da SE, como é o caso dos disjuntores D1, D3, D4, D7, D10 e D11. Já as correntes de curto-circuito nos disjuntores D5 e D6 aumentaram 21.5%, e nos disjuntores D8 e D9, houve a maior elevação (31.6%). No caso dos disjuntores que aumentaram seus níveis de correntes de curto-circuito, onde não se pode enxergar visualmente no diagrama unifilar alterações na rede a eles conectados, o efeito pode ser entendido em função dos equivalentes da

rede, e portanto, indica que de fato houve aumento na capacidade instalada de geração, embora não representados no diagrama. No caso do disjuntor interligador, a corrente de curto-circuito aumentou de 8962.2 A para 11791 A, ou seja, também aumentou 31.6%.

Com relação à superação de disjuntores, considerou-se os casos de ICCS 20 kA e 31.5 kA a fim de comparar os dados da SE antes e após a expansão da rede. Os dados relativos à relação do maior nível de curto-circuito com a capacidade de interrupção nominal do disjuntor, em valores percentuais, para os curto-circuitos monofásico, trifásico e bifásico-terra estão expostos nas Tabelas 6.33 e na 6.34. As informações das tabelas foram obtidas pelo programa desenvolvido nesse trabalho, na modelagem no nível seção de barras, utilizando o método em dois estágios.

Tabela 6.33 – Comparação entre a SE de João Câmara II antes e após sua expansão para superação de disjuntores, considerando a relação ICC/ICCS, para ICCS de 20 kA.

R	Análise da Relação ICC/ICCS (%)			João Cá	imara II		João Câmara II (Expansão)				
Tipo	de curto	ICCS	FT	3F	FFT	Situação	FT	3F	FFT	Situação	
	ID1	20	81,4	91,1	87,3	Alerta	98,66	116	110	Superado	
	ID2	20	59,6	67,4	64,1	OK	71,23	83,5	78,4	OK	
	ID3	20	80,9	91,0	87,1	Alerta	98,21	116	110	Superado	
	ID4	20	80,4	91,0	86,9	Alerta	97,78	116	109	Superado	
5	ID5	20	84,5	84,8	84,7	OK	100,2	105	103	Superado	
Ĕ	ID6	20	84,5	84,8	84,7	OK	100,2	105	103	Superado	
isi	ID7	20	85,9	91,8	89,1	Alerta	103,5	117	112	Superado	
	ID8	20	84,1	87,0	85,9	OK	100,8	110	106	Superado	
	ID9	20	83,8	87,4	86,0	OK	100,4	111	106	Superado	
	ID10	20	87,7	89,7	88,8	OK	105,8	115	111	Superado	
	ID11	20	84,2	88,1	86,3	OK	102,0	113	109	Superado	
	ID12	20	-	-	-	-	102,2	114	109	Superado	

Tabela 6.34 – Comparação entre a SE de João Câmara II antes e após sua expansão para superação de disjuntores, considerando a relação ICC/ICCS, para ICCS de 31.5 kA.

Análice de											
R	Análise da Relação ICC/ICCS (%)			João Câ	àmara II		João Câmara II (Expansão)				
Tipo	de curto	ICCS	FT	3F	FFT	Situação	FT	3F	FFT	Situação	
	ID1	31,5	51,7	57,8	55,4	OK	62,6	73,9	69,7	OK	
	ID2	31,5	37,9	42,8	40,7	OK	45,2	53,0	49,8	OK	
	ID3	31,5	51,3	57,8	55,3	OK	62,4	73,9	69,6	OK	
	ID4	31,5	51,0	57,8	55,2	OK	62,1	73,9	69,5	OK	
5	ID5	31,5	53,7	53,9	53,8	OK	63,6	66,9	65,4	OK	
Ĕ	ID6	31,5	53,7	53,9	53,8	OK	63,6	66,9	65,4	OK	
isic	ID7	31,5	54,5	58,3	56,6	OK	65,7	74,4	70,9	OK	
	ID8	31,5	53,4	55,3	54,5	OK	64,0	69,9	67,3	OK	
	ID9	31,5	53,2	55,5	54,6	OK	63,8	70,3	67,6	OK	
	ID10	31,5	55,7	56,9	56,4	OK	67,2	73,0	70,6	OK	
	ID11	31,5	53,4	56,0	54,8	OK	64,8	72,0	69,0	OK	
	ID12	31,5	-	-	-	-	64,9	72,4	69,3	ОК	

Para uma corrente de interrupção simétrica de 20 kA, no caso da subestação antes da expansão, alguns disjuntores estavam em estado de *Alerta*, à medida que outros estavam *OK*. Já considerando a ampliação do sistema elétrico, todos os disjuntores mostraram-se

Superados para essa capacidade de interrupção, à exceção do disjuntor interligador. Em ambos os casos, portanto, o disjuntor interligador mostra-se classificado como *OK*.

Para uma ICCS de 31.5 kA, de acordo com os critérios do ONS, para ambos os cenários avaliados — 2019 e 2023 —, todos os disjuntores apresentaram-se classificados como *OK*. Entretanto, para a caso da subestação sob o contexto expandido da rede, alguns disjuntores estão apontados com uma relação ICC/ICCS superior a 70%, e sob essa condição, torna-se recomendável pelo ONS que se realize a análise do X/R. Para evitar esse estudo investigativo, que tomam tempo e geram custos para os agentes de transmissão, é recomendável a implementação de disjuntores com ICCS nominal de 40 kA.

6.5 Considerações finais do capítulo

No caso de estudo da subestação de Cutia 34.5 kV, onde foi atribuída uma configuração hipotética em sua modelagem no nível de seção de barras, foi possível realizar a validação do programa desenvolvido para o método em dois estágios, a partir da obtenção das correntes de curto-circuito na ocorrência de uma falta monofásica.

Após a confirmação de que a ferramenta proposta para o método em dois estágios fora eficaz, pôde-se analisar o caso factual da subestação de João Câmara II 230 kV, com sua topologia de barramento duplo com interligador. Primeiramente, foi executado o estudo para verificar o funcionamento do método no segundo estágio para uma condição de falta monofásica em um dos barramentos da subestação.

Confirmada a funcionalidade do método também para essa subestação, foi aplicado o curto-circuito trifásico para três condições diferentes de configuração da subestação, alterando-se o estado de seus disjuntores. Comparando essas situações, contatou-se que ao fazer o seccionamento de uma LT de um barramento para o outro da subestação, a corrente no disjuntor interligador é afetada. Nesse contexto, realizou-se o balanceamento das cargas na subestação através do método de otimização linear, de modo a encontrar o menor desvio entre as injeções de cada barramento e obter a menor corrente possível no disjuntor interligador da SE, evitando o superdimensionamento desse disjuntor.

É interessante mencionar que ao realizar o balanceamento das cargas em uma subestação, outros fatores podem ser levados em consideração, além das correntes de contribuição de curto-circuito. Por exemplo, é recomendável que as cargas e as gerações sejam distribuídas de modo que não estejam todas as fontes de geração ou cargas conectadas sobre um único barramento da SE. Essa prática deve ser adotada pois, considerando a ocorrência de uma falta na subestação, um de seus barramentos pode ficar temporariamente fora de operação, e nesse sentido, distribuindo-se as cargas e gerações, os impactos e prejuízos por eventuais cortes de carga são amortizados, uma vez que tal medida confere maior confiabilidade ao sistema, sendo justamente uma das funcionalidades de arranjos de subestações por barramento duplo com interligador.

Utilizando como referência a primeira configuração da SE de João Câmara, sem o balanceamento ótimo — porém satisfatoriamente equilibrada —, foram verificadas as correntes de superação dos disjuntores na subestação. A princípio, foram feitas as simulações no ANAFAS, que aplica as condições de falta na barra, na linha e de *lineout* para as faltas monofásica, bifásica-terra e trifásica, totalizando nove simulações por disjuntor. A partir do relatório de análise disponível no ANAFAS, é possível obter as maiores correntes de curto-circuito passantes nos disjuntores, porém o programa realiza a análise apenas para o primeiro estágio da SE (barra-ramo) e não calcula a corrente no disjuntor interligador, que atribui-se ao segundo estágio do método (seção de barras). Então, para o interligador, utiliza-se a análise do ONS, onde ele é dimensionado pelo maior valor de corrente de curto-circuito que passa pelos demais disjuntores.

Para averiguar que essa aproximação realizada pelo ONS seja válida, o programa desenvolvido foi utilizado para calcular as correntes nos disjuntores no nível de seção de barras da SE. Através de sua modelagem e dos dados do primeiro estágio exportados pelo ANAFAS, foram aplicadas as três diferentes condições de falta para os três curto-circuitos citados anteriormente, atribuídas aos estudos referentes à superação de disjuntores. Assim, obtiveram-se as correntes de curto-circuito nos disjuntores, com o objetivo de encontrar a corrente incidente sobre o disjuntor interligador.

Comparando os resultados obtidos através do programa desenvolvido e do ANA-FAS, constatou-se que, para os três tipos de falta analisadas, houve diferenças significativas apenas na corrente do disjuntor interligador, sendo que os resultados obtidos para os outros disjuntores foram iguais em ambos os casos, uma vez que para esses disjuntores, as correntes no nível de seção de barras convergem para a análise sob a abordagem barra-ramo. Retornando o foco ao interligador, as diferenças encontradas ocorreram devido ao ONS atribuir a esse disjuntor a pior condição de corrente de curto-circuito, ou seja, tal disjuntor estaria dimensionado para qualquer configuração da subestação ou condição de falta.

Na avaliação do ANAFAS, para uma capacidade de interrupção simétrica de 20 kA, o disjuntor se encontraria em estado de *Alerta*, ou seja, teria que ser considerada a substituição do equipamento, o que implicaria em custos operacionais, de mão-de-obra e aquisição. Porém, pelo método em dois estágios, verificou-se que o disjuntor estava *OK*, dispensando a necessidade da substituição do equipamento.

No último caso de estudo, considerou-se que na subestação anterior, de João Câmara II, seja inserido o parque de geração eólica de Aventura, além da projeção de expansão da rede em geral, prevista para o ano de 2023. A topologia da SE não foi alterada com a inserção da nova fonte geradora. Para essa situação, assim como no caso anterior, foi realizada a validação do método em dois estágios; o balanço de cargas utilizando o método de otimização linear; e a análise de superação de disjuntores presentes na subestação. As análises obtidas para o balanceamento de carga foram as mesmas em relação às estudadas na subestação sem a expansão. No caso de superação de disjuntores, notou-se que para uma ICCS de 20 kA todos os disjuntores, à exceção do interligador, estariam superados. Na análise realizada pelo ANAFAS, o disjuntor interligador também estaria *Superado*.

Por fim, comparando o caso de estudo de João Câmara II, antes e após a expansão da rede, constatou-se que na ocorrência de uma falta monofásica, a corrente no disjuntor interligador e nas LTs ligadas à barra de João Câmara III, que representa um equivalente do sistema, sofreram um considerável aumento. Na condição de curto-circuito trifásico, as correntes nos disjuntores das linhas de transmissão citadas anteriormente também aumentaram, e o mesmo ocorreu nos outros equivalentes da rede, ou seja, nas linhas de transmissão conectadas às barras 8653 e 8607. Esse efeito pode ser compreendido devido ao aumento da capacidade instalada de geração nesses equivalentes, que podem não serem visto no diagrama unifilar do sistema.

Confrontando os resultados obtidos na análise de superação dos disjuntores em ambos os casos, observou-se que para uma corrente de interrupção simétrica de 20 kA na SE sob a rede expandida, os disjuntores estavam superados, exceto o interligador, à medida que na SE anterior à ampliação, verificou-se que alguns disjuntores estavam em estado de *alerta* e outros *OK*. Para uma ICCS de 31.5 kA, todos os disjuntores, nas duas configurações, estão classificados como *OK*, todavia, para o caso da subestação com expansão, alguns disjuntores estão com uma relação ICC/ICCS superior a 70%, e recomenda-se utilizar um disjuntor de 40 kA para evitar a investigação do X/R. Esse estudo comprova que ao dimensionar um disjuntor na subestação, é importante considerar as expansões do sistema. O agente de transmissão pode encontrar as informações referentes à ampliação do sistema elétrico no Plano de Ampliações e Reforços da Rede Básica, publicado pelo ONS.

7 CONCLUSÃO

7.1 Conclusões e discussões finais

A análise realizada em subestações elétricas, partindo-se de sua modelagem no nível de seção de barras, apresenta-se como uma abordagem de fundamental importância no setor elétrico, uma vez que ao se assumir a representação completa de uma subestação, considerando todos os seus ramos e nós internos, permite-se avaliar as condições factuais quanto à distribuição de seus parâmetros elétricos, tais como níveis de tensão, corrente e fluxo de potência. Do contrário, considerando a modelagem convencional barra-ramo de redes elétricas, não seria permitida a extração de tais informações, visto que toda a subestação passa a ser reduzida a uma barra do sistema, desprezando-se portanto sua estrutura interna. Nesse sentido, pode-se estabelecer as motivações guiadas pela representação no nível de seção de barras de uma subestação, uma vez que assumindo essa modelagem, o dimensionamento dos dispositivos de manobra e proteção da SE possam ser realizadas sob precisos graus de segurança e confiabilidade. No presente trabalho, tratou-se da representação no nível de seção de barras para subestações sob o contexto de curto-circuitos, o qual consiste em uma análise determinante para o dimensionamento e avaliação da superação de seus disjuntores.

O método para o cálculo de curto-circuito em dois estágios, desenvolvido pelos autores, apresentou-se como uma ferramenta relevante de análise para redes modeladas no nível de subestação, de modo que, sob a aplicação do algoritmo de programação elaborado, e partindo-se dos resultados de curto-circuito obtidos pelo ANAFAS no primeiro estágio, assim como em posse também dos dados referentes à configuração da subestação, permitiuse a determinação das correntes elétricas de falta incidentes sobre todos os seus disjuntores fechados.

Para o caso de estudo considerado, a SE de João Câmara II - 230 kV, sendo esta uma subestação de barramento duplo com disjuntor interligador, a aplicação do método permitiu a análise do balanceamento das cargas que incidem sobre ambos os seus barramentos. Nesse sentido, foram apontadas as motivações e vantagens de se adotar a condição de equilíbrio entre elas, uma vez que os níveis de curto-circuito sobre o disjuntor interligador tendem a assumir valores extremos em situações de assimetria. E assim, considerando o melhor caso de equilíbrio, determinado por um processo de otimização, comprovou-se que sob esta condição ótima de distribuição, os níveis de curto-circuito sobre o disjuntor interligador são reduzidos, o que pode implicar, por exemplo, evitar a sua substituição para um disjuntor de maior valor nominal de capacidade de interrupção, que poderia ser necessário no caso de um desequilíbrio de cargas.

No estudo de superação de disjuntores para essa subestação, foi possível observar

que a única diferença encontrada entre as abordagens do método de dois estágios, e a ferramenta própria para análise de superação do ANAFAS, deveu-se ao disjuntor interligador. Essa resposta é fácil de compreender considerando que os demais disjuntores situam-se adjacentes à subestação, ou seja, estão "acessíveis" pela modelagem barra-ramo do sistema tratada pelo ANAFAS, implicando na convergência de resultados para ambos os casos. No entanto, o mesmo não se pode dizer sobre o disjuntor interligador, uma vez que se permita sua representação apenas na modelagem via seção de barras. Assim, o ONS atribui ao interligador os piores casos dos níveis de curto determinados aos demais disjuntores, o que se traduz numa convenção conservadora, uma vez que essa condição só poderia ser tratada por verdadeira assumindo uma aguda assimetria de cargas entre os barramentos da SE. No entanto, conforme já mencionado, o balanço de cargas implica em redução nos níveis de curto-circuito, e nesse sentido, permite-se que o interligador possa ser tratado como OKna abordagem pelos dois estágios — considerando uma distribuição equilibrada de cargas —, uma vez que pelo ANAFAS, esse seria tratado como em estado de alerta, conforme ocorreu no caso simulado.

E por fim, a partir dos ensaios realizados ao se considerar as previsões de expansão da rede elétrica para um horizonte de quatro anos, mostra-se evidente a necessidade de frequentes estudos no que concerne ao planejamento do setor elétrico, uma vez que considerando os acréscimos da capacidade instalada de geração da rede analisada, praticamente todos os seus disjuntores poderiam estar superados — tomando como base os valores acadêmicos a eles atribuídos. Desta forma, o método descrito neste trabalho de conclusão apresenta-se como uma ferramenta significativa aos estudos de planejamento do sistema elétrico, de modo que, a partir de sua utilização, pode-se projetar e dimensionar de maneira precisa os disjuntores necessários a serem instalados nas subestações, a fim de operar e atuar diante os novos níveis de curto-circuito resultantes de expansão da capacidade instalada, sob os motes técnico, econômico e de segurança do sistema.

7.2 Sugestão de trabalhos futuros

Propõe-se que o método em dois estágios para o cálculo de curto-circuito, enunciado e descrito no presente trabalho, possa servir de partida para estudos e trabalhos subsequentes, sugerindo-se assim os seguintes temas:

- Acrescentar ao algoritmo do método a possibilidade de se inserir todos os disjuntores da subestação, ligados e desligados, que permita apenas inserir "1" ou "0" na entrada de dados, a fim de indicar quais estão ligados, para assim estruturar o grafo da SE;
- Automatizar o processo de análise de superação de disjuntores na modelagem barraramo pelo método em dois estágios, sem que seja necessária a reprodução de todas as condições caso-a-caso;
- Analisar a superação de disjuntores na modelagem de seção de barras no contexto das inserções de GD, em subestações dispostas no nível da distribuição;
- Estender a análise da superação de disjuntores abordando a relação X/R do sistema.

Referências

ABEEOLICA. Boletim anual de geração eólica 2018. Associação Brasileira de Energia Eólica, 2018. Citado na página 7.

ANAFAS. Análise de faltas - versão 7.2.0 - manual do usuário. Dezembro 2017. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

ANEEL. Atlas de energia elétrica do Brasil (3ª edição). 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap1.pdf>. Citado 3 vezes nas páginas 4, 5 e 6.

ANEEL. Cartilha de acesso ao sistema de distribuição. **PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional**, Janeiro 2011. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Cartilha_Revisao_2.pdf>. Citado na página 29.

AZEVEDO, M. P. Arranjos de subestações de alta tensão. Dissertação de Bacharelado em Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Dezembro 2015. Citado na página 40.

CBIE. Quantos quilômetros de linha de transmissão de energia temos no brasil? **Centro Brasileiro de Infraestrutura**, Abril 2019. Disponível em: https://cbie.com.br/artigos/quantos-quilometros-de-linha-de-transmissao-de-energia-temos-no-brasil/. Citado na página 29.

CEPEL. **ANAFAS - Manual do Usuário**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2019. Citado na página 59.

COSTA, S. F. Definições e estudos do sistema elétrico que servem de base para as especificações técnicas dos equipamentos para subestações de transmissão e distribuição. **Revista O Setor Elétrico**, Janeiro 2015. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

D'AJUZ, A. Equipamentos elétricos: especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985. Citado 4 vezes nas páginas 41, 42, 43 e 49.

DUALIBE, P. Subestações: Tipos, equipamentos e proteção. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Novembro 1999. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 30.

Exposito, A. G.; de la Villa Jaen, A. Reduced substation models for generalized state estimation. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 16, n. 4, p. 839–846, Nov 2001. Citado na página 70.

FEOFILOFF, P.; KOHAYAKAWA, Y.; WAKABAYASHI, Y. **Uma Introdução Sucinta** à Teoria dos Grafos. 2011. Disponível em: https://www.ime.usp.br/~yw/publications/books/TeoriaDosGrafos.pdf>. Citado na página 25.

FERREIRA, C. S. Alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito em redes de energia elétrica utilizando algoritmos genéticos. Dissertação de Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Março 2006. Citado 5 vezes nas páginas 45, 47, 48, 49 e 58.

FERREIRA, C. S. Solução do problema de superação de disjuntores pela alocação ótima de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito utilizando algoritmos genéticos. **Revista Controle & Automação**, Outubro, Novembro e Dezembro 2007. Citado 2 vezes nas páginas 43 e 44.

FILHO, J. M. Manual de Equipamentos Elétricos. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

FILHO, J. M. Instalações Elétricas Industriais. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 29, 30 e 42.

FOLETTO, T. P. Metodologia em dois estágios para cálculo de fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação. **Departamento de Engenharia Elétrica**, **Universidade Federal do Paraná**, 2019. Citado 11 vezes nas páginas 26, 31, 32, 33, 34, 35, 37, 38, 39, 40 e 57.

FOUNDATION, P. S. About Python. [s.n.], 2019. Disponível em: https://www.python.org/about/. Citado na página 59.

JUNIOR, A. P. B.; MEDEIROS, B. T. Aplicação de fluxo de potência no nível de subestação à sistemas de potências reais. **Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Paraná**, 2009. Citado na página 8.

JUNIOR, A. R. B.; DUARTE, I. S. Alocação de limitadores de corrente de curto-circuito via algoritmos genéticos. **Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade** Federal do Paraná, 2010. Citado 8 vezes nas páginas 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49 e 58.

JUNIOR, R. R. P. Fluxo de potência em redes modeladas no nível de subestação. Dissertação para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE da Universidade Federal do Paraná, 2005. Citado na página 9.

KINDERMANN, G. **Curto-Circuito**. 2. ed. Porto Alegre: Sagra Luzzatto, 1997. Citado 10 vezes nas páginas 10, 11, 12, 13, 14, 15, 17, 18, 23 e 24.

KOGA, B. N. T. Análise de curto-circuito no nível de seção de barras. **Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Paraná**, 2017. Citado na página 9.

LEON, S. J. Álgebra linear com aplicações. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. Citado na página 27.

LOURENCO, E. M.; JUNIOR, A. P. B.; MEDEIROS, B. T. Fluxo de carga desacoplado rápido em redes modeladas no nível de seção de barra. **SBSE,2010 - III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, 2010. Citado na página 9.

MCDONALD, J. D. Electric Power Substations Engineering. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2012. Citado na página 30.

MME. Plano decenal de expansão de energia 2029. **EPE - Empresa de Pesquisa Energética**, Março a Setembro 2019. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 7.

MUZY, G. L. Subestações elétricas. Projeto de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012. Citado 9 vezes nas páginas 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39 e 40.

NBR-14039. Instalações elétricas de média tensão de 1,0 kv a 36,2 kv. **ABNT - Associa**ção Brasileira de Normas Técnicas, Maio 2005. Citado na página 30.

NETTO, P. O. B. **Grafos: Teoria, Modelos, Algoritmos**. 4. ed. São Paulo: E. Blücher, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

OCTAVE. Gnu octave - versão 5.1.0 - manual do usuário. 2019. Citado na página 59.

ONS. Submódulo 11.3 estudos de curto-circuito. **Resolução Normativa nº 372/09**, Agosto 2009. Disponível em: http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM% C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3%2FSubm%C3%B3dulo%2011.3_Rev_ 1.0.pdf>. Citado na página 51.

ONS. Critérios para análise de superação de equipamentos e instalações de alta tensão. Nota Técnica ONS nº0048/2014, Novembro 2014. Citado 8 vezes nas páginas 42, 43, 44, 49, 50, 52, 53 e 58.

ONS. O Sistema em Números. 2017. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros. Citado na página 5.

ONS. Estudos de curto-circuito período 2018-2023 - volume 1. Fevereiro 2019. Citado 2 vezes nas páginas 51 e 52.

ONS. Mapa dinâmico do SIN. 2019. Disponível em: ">http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>">http://www.ons.org.br/paginas/

ONS. Mapa Sistema de Transmissão ONS. 2019. Disponível em: http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Citado na página 5.

ONS. O Sistema Interligado Nacional. 2019. Disponível em: http://www.ons.org. br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>. Citado 2 vezes nas páginas 5 e 6.

ONS. Planejamento elétrico de médio prazo do sin. **PAR/PEL Executivo 2020-2024**, Outubro 2019. Citado 2 vezes nas páginas 6 e 8.

PAREDES, A. E. Integração de sistemas de supervisão, proteção e automação de subestações de energia elétrica. Dissertação de Mestrado em Ciências em Automação e Sistemas Elétricos Industriais, Universidade Federal de Itajubá, Novembro 2002. Citado 2 vezes nas páginas 40 e 41.

RABITO, C. E.; PALOMA, R. R.; SILVESTRI, T. C. Especificação de disjuntores de alta tensão com base na superação por curto-circuito e tensão de restabelecimento transitória. **Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná**, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.

aprender Python: RAMOS, V. Porquê motivos come- $\mathbf{5}$ para car agora! 2018.Disponível em: <https://pythonacademy.com.br/blog/ porque-aprender-python-5-motivos-para-aprender-agora>. Citado na página 59.

ROEPER, R. Correntes de curto-circuito em redes trifásicas. 6. ed. São Paulo: Livraria Nobel S.A., 1990. Citado 6 vezes nas páginas 10, 12, 13, 14, 15 e 17.

ROSAS, G. B.; LOURENCO, E. M.; FERNANDES, T. S. Modelagem de ramos de impedância nula no problema de fluxo de potência ótimo. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, scielo, v. 23, p. 766 – 781, 12 2012. ISSN 0103-1759. Disponível em: <a href="http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid="http://www.scielo.br/scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid="http://www.scielo.br/scielo.br

SATO, F.; FREITAS, W. Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2015. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 23.



