

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Mauro dos Santos Ortiz

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS DURANTE PARALELISMO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Santa Maria, RS
2019

Mauro dos Santos Ortiz

**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS
DURANTE PARALELISMO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Orientador: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon
Coorientador: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

Santa Maria, RS
2019

dos Santos Ortiz, Mauro
METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS
ELETROMAGNÉTICOS DURANTE PARALELISMO EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA / Mauro
dos Santos Ortiz.- 2019.
118 p.; 30 cm

Orientador: Daniel Pinheiro Bernardon
Coorientador: Luciano Lopes Pfitscher
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica, RS, 2019

1. Paralelismo de alimentadores 2. Restabelecimento
de energia 3. Transferências de carga em cascata 4.
Sistemas de distribuição 5. Self-healing I. Pinheiro
Bernardon, Daniel II. Lopes Pfitscher, Luciano III.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados
fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos
Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt
Patta CRB 10/1728.

© 2019

Todos os direitos autorais reservados a *Mauro dos Santos Ortiz*. A reprodução de partes ou do todo
deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Av. Roraima, 1000, UFSM, Santa Maria, RS. CEP 97105-900.

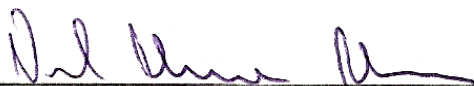
Fone (0xx) (55) 3220-8792; Endereço Eletrônico: mauro_sortiz@hotmail.com

Mauro dos Santos Ortiz

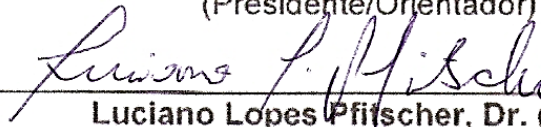
**METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS
DURANTE PARALELISMO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DE
GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

Aprovado em 29 de julho de 2019:



Daniel Pinheiro Bernardon, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Luciano Lopes Pfischer, Dr. (UFSC)
(Coorientador)



Ederson Pereira Madruga, Dr. (UNIVATES) - Videoconferência



Maicon Jaderson Silveira Ramos, Dr. (UFRGS) - Videoconferência

Santa Maria, RS
2019

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pelo dom da vida, e pelas graças concedidas, que me possibilitaram chegar até aqui.

Agradeço a meus pais, Dilva e João Cezar (*in memoriam*) por todos os ensinamentos, carinho, e apoio em todas as minhas escolhas de vida e, em especial, pelo incentivo a continuidade de meus estudos.

Ao Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon pela confiança, paciência e orientação neste trabalho. Muito obrigado pela amizade e pelos conhecimentos compartilhados.

Ao Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher pela coorientação e contribuição para a realização deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Fabrício Augusto Matheus Moura pela sua grande ajuda e contribuição no desenvolvimento desta dissertação.

Aos membros da banca, Prof. Dr. Ederson Pereira Madruga e Prof. Dr. Maicon Jaderson Ramos, pela colaboração e sugestões no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos e colegas do Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência e da pós-graduação em Engenharia Elétrica, em especial, ao Caio dos Santos, Émerson da Silva, Lucas Dazzi, Marina Camponogara e Robson Porsch pela troca de ideias, cooperação durante as pesquisas e principalmente pela forte amizade.

Aos meus colegas de apartamento e amigos, Gabriel e Pedro Eisenkraemer pelo apoio, paciência e parceria de longa data.

À Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Tecnologia e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica por todas as oportunidades, estrutura e suporte para o aprendizado e desenvolvimento técnico e científico.

Ao INCT-GD e aos órgãos financiadores (CNPq processo 465640/2014-1, CAPES processo no. 23038.000776/2017-54 e FAPERGS 17/2551-0000517-1).

A todas as pessoas que ao longo de minha vida contribuíram de alguma forma para meu crescimento pessoal e profissional.

Ein besonderer Dank gilt meiner Freundinnen und Freunden in Deutschland, die mich mit ihren positiven Gedanken, Worten und Gebeten begleitet haben. Abschließend danke ich Herrn Dompropst Reinhold Pfafferodt für seine Unterstützung, interessante Gespräche und Erfahrungen, sowie seinen motivierenden Beistand während meiner Studienzeit.

„Die Hälfte des Lebens ist Glück,
die andere ist Disziplin -
und die ist entscheidend,
denn ohne Disziplin könnte man
mit seinem Glück nichts anfangen“.

Carl Zuckmayer

RESUMO

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS DURANTE PARALELISMO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO COM PRESENÇA DE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

AUTOR: Mauro dos Santos Ortiz

ORIENTADOR: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon

COORIENTADOR: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

O paralelismo de alimentadores radiais de redes primárias de distribuição é uma técnica que pode ser utilizada para alterar a topologia da rede em regime normal de operação, manutenções programadas ou mesmo em casos de contingência. Neste trabalho, apresentam-se contribuições referentes ao estudo de paralelismo em redes elétricas inteligentes (*smart grids*) dotadas da capacidade de *self-healing*. O *self-healing* compreende sistemas de restabelecimento automático de energia capazes de detectar e identificar diferentes tipos de faltas no sistema, diagnosticar a causa das interrupções no fornecimento e rapidamente compensar o problema com o apoio de alimentadores vizinhos. Para diminuir o tempo das interrupções, maximizar o número de clientes restabelecidos e reduzir a área defeituosa da rede, o paralelismo, que consiste em ligar temporariamente os alimentadores do sistema em anel para transferir carga entre eles, apresenta-se como uma ferramenta que pode agilizar o processo de recuperação da rede. Nesse sentido, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica dos paralelismos em redes de distribuição para restaurar a energia elétrica ao maior número possível de consumidores, com transferências em cascata das cargas entre seus alimentadores. Este estudo trata de uma particularidade dos sistemas de distribuição, quando determinado alimentador não pode suprir novas cargas sem ter parte de seu carregamento aliviado para outro alimentador. Durante a mudança de topologia da rede, através da abertura e do fechamento dos equipamentos de manobra telecomandados, como chaves seccionadoras ou religadores automáticos, transitórios eletromagnéticos indesejáveis na tensão e/ou na corrente podem ocorrer, provocando danos ao longo da rede. Para tornar esta análise ainda mais realística, a metodologia proposta neste trabalho é testada em um estudo de caso em uma rede de distribuição com dispositivo de controle Volt-Var e modelo dinâmico de geração distribuída. A viabilidade técnica e operacional das manobras é verificada a partir de simulações computacionais no programa ATPDraw. Os resultados obtidos demonstram que esta aplicação é ágil e eficiente e atende aos objetivos de auto restabelecimento de redes de distribuição em situação de contingência.

Palavras-chave: Paralelismo de alimentadores. Restabelecimento de energia. Transferências de carga em cascata. Sistemas de distribuição. *Self-healing*.

ABSTRACT

METHODOLOGY FOR ELETROMAGNETIC TRANSIENTS ANALYSIS DURING PARALLELISM IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH THE PRESENCE OF DISTRIBUTED GENERATION

AUTHOR: Mauro dos Santos Ortiz
ADVISOR: Prof. Dr. Daniel Pinheiro Bernardon
CO-ADVISOR: Prof. Dr. Luciano Lopes Pfitscher

The parallelism of radial feeders of primary distributions networks is a technique that can be used to change the topology of the network under normal operating conditions, scheduled maintenance, or even in contingency cases. In this paper, contributions related to the study of parallelism in smart grids endowed with the capacity of self-healing are presented. Self-healing comprises automatic energy recovery systems capable of detecting and identifying different types of faults in the system, diagnosing the cause of the interruptions in supply, and quickly compensating the problem with the support of neighboring feeders. To minimize the time of interruptions, maximize the number of clients restored and reduce the defective area of the network, parallelism, which consists of temporarily connecting the system feeders in ring arrangement to transfer load between them, is a tool that can speed up the network recovery process. In this sense, the proposal of this work is the development of a methodology for the analysis of the technical feasibility of parallelisms in distribution networks to restore the electric energy to the largest possible number of consumers, with cascade transfers of loads between their feeders. The case under study covers a particularity of distribution systems, which happens when certain feeder cannot supply new loads without having part of its load relieved to another feeder. During the change of network topology, by opening and closing remote-controlled switching devices, such as automatic disconnecting switches or reclosers, undesirable electromagnetic transients in the voltage and/or current may occur, causing damage along the network. To make this analysis even more realistic, the proposed methodology in this work is tested in a case study in a distribution network with a Volt-Var control device and a dynamic model of distributed generation. The technical and operational feasibility of the maneuvers is verified through computational simulations in the ATPDraw program. The results show that this application is agile and efficient and meets the objectives of the self-reestablishment of distribution networks in a situation of contingency.

Keywords: Parallelism of feeders. Restoration of energy. Cascade load transfers. Distribution systems. Self-healing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Tendência de desenvolvimento das <i>smart grids</i>	25
Figura 2.1 – Rede de distribuição radial com possibilidade de alteração da topologia.	32
Figura 2.2 – RD após o paralelismo de AL1 e AL3.	32
Figura 2.3 – Paralelismo do tipo I: ALs derivados do mesmo transformador.	33
Figura 2.4 – Paralelismo do tipo II: ALs derivados de transformadores diferentes.	34
Figura 2.5 – Paralelismo do tipo III: ALs derivados de diferentes transformadores e subestações.	35
Figura 2.6 – Representação de transitórios impulsivos.	37
Figura 2.7 – Representação de transitórios oscilatórios.	37
Figura 2.8 – Transitórios eletromagnéticos durante o paralelismo em uma RD.	39
Figura 2.9 – Efeito da diferença de fase no transitório de corrente de um alimentador.	40
Figura 2.10 – Oscilação transitória na tensão de um banco de capacitores.	41
Figura 2.11 – Paralelismo de alimentadores para solucionar problema de sobrecarga na rede: (a) situação original; (b) reconfiguração da rede em regime normal de operação.	43
Figura 2.12 – Processo tradicional de restabelecimento de energia.	45
Figura 3.1 – Fluxograma para análise de paralelismo em cascata em RDs.	56
Figura 3.2 – Execução do 1º passo da sequência de manobras em uma RD.	57
Figura 3.3 – Execução do 2º passo da sequência de manobras em uma RD.	58
Figura 3.4 – Execução do 3º passo da sequência de manobras em uma RD.	59
Figura 3.5 – Execução do 4º passo da sequência de manobras em uma RD.	60
Figura 3.6 – Execução do 5º passo da sequência de manobras em uma RD.	61
Figura 3.7 – Retorno do 6º ao 4º passo com definição das manobras de paralelismo em cascata.	62
Figura 3.8 – Execução das transferências de carga em cascata na RD do exemplo.	63
Figura 3.9 – Configuração do ATPDraw para o estudo de caso.	65
Figura 3.10 – Representação do gerador síncrono distribuído no ATPDraw.	69
Figura 3.11 – Modelo do regulador de tensão do tipo I do IEEE.	69
Figura 3.12 – Atraso de tempo nas rotinas criadas em TACS no ATPDraw.	70
Figura 3.13 – Representação do regulador de tensão tipo I do IEEE no ATPDraw.	71
Figura 3.14 – Modelo do regulador de velocidade do gerador síncrono.	72
Figura 3.15 – Representação do regulador de velocidade no ATPDraw.	72
Figura 4.1 – Rede de distribuição em estudo.	75
Figura 4.2 – Modelo da rede no ATPDraw.	77
Figura 4.3 – Representação do local do defeito na RD.	78
Figura 4.4 – Violação do limite de carregamento desconsiderando a transferência em paralelo para restauração da energia elétrica.	79
Figura 4.5 – Comportamento da corrente dos alimentadores: (a) AL2; (b) AL3.	81
Figura 4.6 – Detalhe da corrente máxima no AL2.	83

Figura 4.7 – Detalhe da corrente na chave (CH4) ao religar os consumidores.	83
Figura 4.8 – Comportamento das correntes no instante de comutação das chaves: (a) Corrente na chave CH6; (b) Corrente na chave CH7.	84
Figura 4.9 – Detalhe dos transitórios de corrente durante o paralelismo nas chaves: (a) CH6; (b) CH7.....	85
Figura 4.10 – Detalhe da tensão na carga AL2-C3.....	86
Figura 4.11 – Detalhe da tensão na carga AL3-C1.....	87
Figura 4.12 – Tensão sobre os consumidores restabelecidos (AL1-C3).	87
Figura 4.13 – (a) Tensão na barra da GD; (b) Detalhe do transitório de tensão na GD.	88
Figura 4.14 – Atuação dos reguladores: (a) de tensão; (b) de velocidade do gerador síncrono durante a simulação.....	89
Figura 4.15 – Variações do ângulo de potência (δ) da máquina.....	90
Figura 4.16 – (a) Potência ativa (P_{GD}) e reativa (Q_{GD}); (b) Fator de potência (FP) do gerador síncrono.....	91
Figura 4.17 – (a) Corrente no BC; (b) Tensão no BC.	92
Figura 4.18 – Frequência do gerador síncrono durante as manobras na rede.	93
Figura 4.19 – Diferença de tensão na chave CH7.	95
Figura 4.20 – RD após as transferências paralelas da carga.	96

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros das linhas de distribuição.....	76
Tabela 4.2 – Regimes de operação durante as transferências em paralelo na RD. .	80
Tabela 4.3 – Resultados das restrições do paralelismo de alimentadores para o estudo de caso apresentado.....	94
Tabela 0.1 – Valores unitários de resistência e reatância dos condutores usualmente utilizados em redes de distribuição.	109
Tabela 0.1 – Parâmetros do gerador síncrono.	117
Tabela 0.2 – Parâmetros do regulador de tensão IEEE Tipo I.	118
Tabela 0.3 – Parâmetros do regulador de velocidade.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS E VARIÁVEIS

C_{BC}	-	Capacitância do banco de capacitores
C_k	-	Número de consumidores restabelecidos do transformador k
$E_{\max}$	-	Máxima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao acampo do gerador)
$E_{\min}$	-	Mínima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador)
E_f	-	Tensão de excitação do gerador síncrono
G_{fb}	-	Ganho do <i>Flyball</i>
$I_{ij,\max}$	-	Corrente máxima admissível do equipamento no ramo “ $i - j$ ”
$I_{ij,\text{prot}}$	-	Ajuste de proteção da corrente admissível do equipamento do ramo “ $i - j$ ”
I_n	-	Corrente nominal
K_a	-	Ganho do regulador
K_e	-	Constante de excitação relacionada com a auto excitação do campo
K_f	-	Ganho de tempo do circuito estabilizante do regulador
N_{CR}	-	Número de consumidores restabelecidos
N_{TR}	-	Número total de transformadores de distribuição restabelecidos
$P_{\max}$	-	Potência mecânica máxima da turbina
P_{ref}	-	Potência mecânica de referência
P_C	-	Potência ativa da carga
$P_{GD,k}$	-	Potência ativa do gerador distribuído k
P_m	-	Potência mecânica no eixo do gerador
Q_{BC}	-	Potência reativa do banco de capacitores
Q_C	-	Potência reativa da carga
$Q_{GD,k}$	-	Potência reativa do gerador distribuído k
R_A	-	Resistência de armadura
R_C	-	Resistência da carga
R_L	-	Resistência unitária da linha por fase
$S_{GD,k}$	-	Potência aparente do gerador distribuído k
$S_{GD,n}$	-	Potência aparente nominal do gerador distribuído
T_1	-	Constante de tempo 1 do sistema de controle
T_2	-	Constante de tempo 2 do sistema de controle
T_3	-	Constante de tempo 3 do sistema de controle
T_4	-	Constante de tempo 4 da turbina hidráulica
T_5	-	Constante de tempo 5 da turbina térmica/hidráulica
T_{fb}	-	Constante de tempo do <i>Flyball</i>
T_a	-	Constante de tempo amplificada do regulador
T'_{d0}	-	Constante de tempo de circuito aberto, transitório de eixo direto
T''_{d0}	-	Constante de tempo de circuito aberto, subtransitória de eixo direto
T_e	-	Constante de tempo da excitatriz

T_f	-	Constante de tempo do circuito estabilizador do regulador
T'_{q0}	-	Constante de tempo de circuito aberto, transitória de eixo de quadratura
T''_{q0}	-	Constante de tempo de circuito aberto, subtransitória de eixo de quadratura
T_r	-	Constante de tempo do filtro de entrada do regulador
$V_{\max}$	-	Tensão máxima admissível
$V_{\min}$	-	Tensão mínima admissível
V_{ref}	-	Tensão de referência
V_e	-	Efeito de saturação da excitatriz
V_i	-	Tensão em regime permanente
V_n	-	Tensão nominal
V_t	-	Tensão nos terminais do gerador síncrono
X_C	-	Reatância da carga
X_L	-	Reatância indutiva unitária da linha por fase
Z_C	-	Impedância da carga
Z_L	-	Impedância do trecho de rede por fase
x_0	-	Reatância de sequência zero
x_L	-	Reatância de dispersão da armadura
x_d	-	Reatância de eixo direto
x'_d	-	Reatância transitória de eixo direto
x''_d	-	Reatância subtransitória de eixo direto
x_q	-	Reatância de eixo de quadratura
x'_q	-	Reatância transitória de eixo de quadratura
x''_q	-	Reatância subtransitória de eixo de quadratura
ΔV_{ij}	-	Diferença de tensão na chave do ramo “ $i - j$ ”
$\Delta \varphi_{ij}$	-	Diferença de ângulo na chave do ramo “ $i - j$ ”
H	-	Constante de inércia
L	-	Comprimento do trecho de rede
P	-	Número de polos
R	-	Regulação
f	-	Frequência
t	-	Tempo
ω	-	Velocidade angular do gerador
ω_{ref}	-	Velocidade angular de referência
ω_s	-	Velocidade angular síncrona
δ	-	Ângulo de potência do gerador síncrono

LISTA DE ABREVIATURAS

ADMS	-	<i>Advanced Distribution Management Systems</i>
AMI	-	<i>Advanced Meter Infrastructure</i>
ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
AL	-	Alimentador
ATP	-	<i>Alternative Transient Program</i>
AVR	-	<i>Automatic Voltage Regulator</i>
COD	-	Centro de Operação da Distribuição
CH	-	Chave de interligação
DBM	-	<i>Data Base Modularization</i>
DER	-	<i>Distributed Energy Resources</i>
EMS	-	<i>Energy Management Systems</i>
FLISR	-	<i>Fault Location, Isolation and Service Restoration</i>
GD	-	Geração Distribuída
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
NA	-	Normalmente Aberto
NF	-	Normalmente Fechada
PRODIST	-	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
RD	-	Rede de Distribuição
SD	-	Sistema de Distribuição
SEP	-	Sistema Elétrico de Potência
GOV	-	<i>Speed Governor</i>
SE	-	Subestação
SCADA	-	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
TR	-	Transformador
TACS	-	<i>Transient Analysis of Control Systems</i>

SUMÁRIO

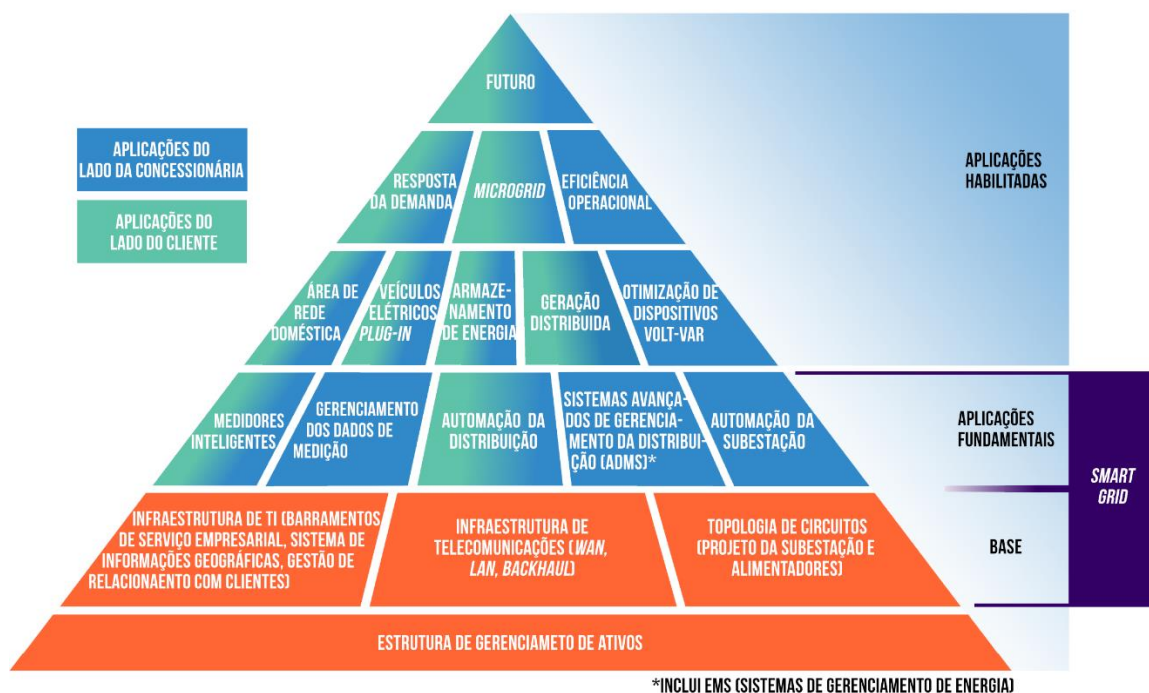
1	INTRODUÇÃO	25
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	27
1.2	OBJETIVO GERAL.....	28
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
1.4	CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO.....	29
1.5	ORGANIZAÇÃO DE CAPÍTULOS	29
2	PARALELISMO DE ALIMENTADORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO ...	31
2.1	CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE PARALELISMO	31
2.2	TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	36
2.3	PARALELISMO NO CONTEXTO DE <i>SELF-HEALING</i>	42
2.4	REQUISITOS PARA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL	45
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	49
3	METODOLOGIA PROPOSTA.....	51
3.1	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	51
3.1.1	Função objetivo e restrições	52
3.2	VISÃO GERAL DA PROPOSTA.....	55
3.3	SEQUÊNCIA DE MANOBRAS PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA	57
3.4	IMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW	64
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	73
4	ESTUDO DE CASO.....	75
4.1	REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO	75
4.2	DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO	77
4.3	ANÁLISE DOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	80
4.4	VERIFICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES TÉCNICAS.....	93
4.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
5	CONCLUSÕES	99
5.1	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE	100
5.2	PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103
	ANEXO A: VALORES UNITÁRIOS DE RESISTÊNCIA E REATÂNCIA DOS CONDUTORES.....	109
	ANEXO B: ALGORITMO PARA IMPLEMENTAR A MÁQUINA SÍNCRONA, O REGULADOR DE TENSÃO E O REGULADOR DE VELOCIDADE NO ATPDRAW.....	111
	ANEXO C: DADOS DA MÁQUINA SÍNCRONA, DO REGULADOR DE TENSÃO E DO REGULADOR DE VELOCIDADE	117

1 INTRODUÇÃO

Com o crescimento da demanda de energia elétrica, garantir o seu fornecimento com qualidade aos consumidores, atendendo aos padrões estabelecidos, são grandes desafios dos sistemas elétricos de potência (SEP), especialmente em seu sistema de distribuição (SD). Em função disso, constantes investimentos em modernizações na sua estrutura atual, a partir da integração de equipamentos automatizados, recursos de tecnologia da informação e comunicação e centrais de monitoramento, processamento e controle, vem buscando ampliar a eficiência operacional e tornar o sistema elétrico mais robusto. Essa nova concepção de SEP é conhecida como rede elétrica inteligente (*smart grid*).

A Figura 1.1 apresenta uma visão geral das tecnologias fundamentais para o desenvolvimento das *smart grids*, como a instalação de medidores inteligentes, a automação da subestação e da distribuição, o gerenciamento dos dados, infraestrutura de telecomunicações, etc. Ainda, é possível visualizar as aplicações habilitadas, como a geração distribuída (GD), o veículo elétrico, a otimização de dispositivos Volt-Var, a resposta da demanda, etc., que representam inovações tanto do lado da concessionária quanto do cliente no desenvolvimento das redes do futuro.

Figura 1.1 – Tendência de desenvolvimento das *smart grids*.



Fonte: Adaptado de (FARHANGI, 2017, p.197).

As *smart grids* representam a evolução das redes elétricas atuais, no sentido de aumento da eficiência e da qualidade de fornecimento, otimização da operação da rede, bem como do respeito ao meio ambiente e da integração de recursos distribuídos (DER, do inglês *Distributed Energy Resources*) de fontes renováveis (BROWN, 2008). A utilização de tecnologias digitais avançadas, permite que o transporte de eletricidade seja monitorado e controlado em tempo real com fluxo de energia e informações bidirecionais entre a fonte geradora de energia e o cliente final (FARHANGI, 2017; STRASSER et al., 2015). Com isso, é possível implantar novas estratégias de controle e gestão da rede de forma muito mais eficaz.

Dentre as características normalmente relacionadas às *smart grids*, (BROWN, 2008; FALCÃO, 2010) destacam: a capacidade auto recuperação do sistema (*self-healing* ou auto restabelecimento), o empoderamento dos consumidores, a resistência a ataques externos físicos e cibernéticos, a alta qualidade da energia provida, a diversidade de fontes de energia e tecnologias associadas à rede, redução do impacto ambiental, o armazenamento de energia, a minimização dos custos de operação e manutenção e mercados competitivos de energia (mercado varejista e *microgrids*).

Mesmo com esses avanços tecnológicos e os investimentos das concessionárias para melhorar a qualidade e continuidade do serviço aos seus consumidores, as interrupções no fornecimento de energia elétrica são inevitáveis. Elas ocorrem tanto para a execução de obras de expansão do sistema, quanto para manutenções preventivas e/ou corretivas em componentes da rede ou, ainda, pela atuação de dispositivos de proteção em decorrência de defeitos. Neste último caso, quando a rede se encontra em situação de contingência, deseja-se que a seção em falta seja identificada rapidamente, restringindo ao mínimo a área desenergizada.

Nesse contexto, está inserido o desenvolvimento das estratégias de *self-healing*, que consistem em sistemas de restabelecimento automático de energia, que buscam reduzir os tempos das interrupções ocasionadas por defeitos na rede, diminuindo os prejuízos aos consumidores além da decorrência de multas determinadas pelo órgão regulador. Para isso, esses sistemas contam com gerenciamento de falhas capazes de detectar e identificar diferentes tipos de faltas (permanentes ou transitórias), e capacidade de rapidamente auto recuperar a rede através da coordenação e otimização de métodos e estratégias de controle associados às *smart grids* (FONSECA, 2017; WANG; WANG, 2015; YIP et al., 2017).

De maneira sucinta, para a realização bem-sucedida dos processos de auto restabelecimento no SD é necessária a integração de dispositivos de comutação inteligentes, sistemas de comunicação eficientes e lógica de restauração automática. Durante este procedimento, a técnica de paralelismo de redes, através da ligação momentânea dos alimentadores em anel, pode ser considerada na reconfiguração da rede para isolar o defeito e redistribuir as cargas.

O paralelismo de alimentadores contribui para reduzir as perdas de energia, melhorar os níveis de tensão e aumentar a confiabilidade da rede, através da mudança de sua topologia (PFITSCHER et al., 2013a). Essa reconfiguração da rede é realizada por meio da abertura e fechamento de dispositivos seccionadores presentes em diversos trechos do sistema, sem que haja a interrupção do fornecimento para os consumidores durante a realização das operações (PFITSCHER et al., 2013b; SANTOS, 2013). Os estudos de paralelismos inserem-se no contexto das *smart grids*, principalmente, no conceito de reconfigurações automáticas e *self-healing*, para verificar a viabilidade das transferências de carga em tempo real.

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Atualmente, cada vez mais dispositivos controlados remotamente vem sendo instalados no SD, o que facilita a alteração da topologia da rede pela mudança de estado (aberto e fechado) das chaves, seccionadores e equipamentos de proteção. Por outro lado, a integração de novas tecnologias na rede, incluindo a geração distribuída (GD), dispositivos de controle Volt-Var, como transformador eletrônico de potência, e os veículos elétricos no sistema, faz com que suas condições de operação variem com mais frequência. Devido a essa dinamicidade cada vez maior do sistema, a ligação da rede em anel para transferências de carga em situação de contingência, requer análises mais detalhadas de sua viabilidade frente aos limites de operação dos diversos equipamentos.

A pesquisa realizada neste trabalho foi motivada pela análise de uma particularidade dos sistemas de distribuição em situação de contingência, quando os alimentadores apresentam carregamento elevado e para que a energia possa ser restaurada ao maior número de consumidores após o isolamento do trecho afetado pela falta, sucessivas transferências de carga em paralelo são realizadas na rede de distribuição (RD) durante o processo de reconfiguração.

Além disso, o trabalho traz uma análise sobre os transitórios eletromagnéticos que podem ocorrer durante os paralelismos em geradores síncronos distribuídos, apresentando as respostas de seus controles, na presença de dispositivo de controle Volt-Var. Esses transitórios são analisados por meio de simulações computacionais no domínio do tempo nos diferentes elementos da rede. Com o emprego desta técnica, busca-se agilizar o processo de restabelecimento de energia após a ocorrência de falhas no sistema.

Em geral, os poucos trabalhos sobre paralelismo de alimentadores apresentam metodologias para transferência de carga com a operação dos alimentadores em paralelo durante curtos intervalos de tempo. Esses trabalhos realizam a verificação dos limites de operação do sistema para que não ocorram paralisações no fornecimento de energia para os consumidores. Normalmente os casos estudados são modelados em algum programa de simulação de sistemas elétricos (ATP, MATLAB, PSCAD) para verificar a viabilidade da realização das manobras naquele sistema. Alguns estudos realizam as manobras no SD, comparando os resultados em campo às simulações para validar os modelos implementados ou a metodologia proposta para realização das manobras.

Existem poucas pesquisas que tratam do processo de restauração de energia elétrica através de consecutivas transferências paralelas de carga nas RDs. Por isso, este trabalho busca preencher esta lacuna em um recente universo de estudo sobre o paralelismo entre alimentadores radiais de distribuição. Este tema ainda é pouco estudado nos dias de hoje, apresentando um número bem reduzido de autores na literatura. Dentre as principais referências encontradas sobre o tema paralelismo de redes, destacam-se os trabalhos de (GARCIA, 2015; PFITSCHER, 2013; SANTOS, 2008, 2013).

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma metodologia para análise da viabilidade técnica e operacional do paralelismo entre alimentadores de uma RD com GD através de transferências de carga em paralelo, visando o restabelecimento da energia elétrica ao maior número possível de consumidores.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos deste trabalho podem ser citados:

- Avaliar a influência da técnica de paralelismo na presença de um gerador distribuído e dispositivo de controle Volt-Var (banco de capacitores);
- Verificar o impacto das transferências paralelas de carga nos reguladores de tensão e velocidade do gerador distribuído;
- Analisar os transitórios eletromagnéticos que ocorrem durante a comutação das chaves para a reconfiguração da rede;
- Avaliar as restrições técnicas e operacionais do paralelismo de redes a fim de determinar sua viabilidade em situações de contingência nas RDs;
- Investigar a capacidade de *self-healing* de uma RD por meio de transferências paralelas da carga;
- Apresentar a modelagem de sistemas elétricos no programa ATPDraw, especialmente do gerador síncrono e seus controles de tensão e velocidade.

1.4 CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Como contribuições dessa dissertação, destacam-se os seguintes tópicos:

- Análise dos paralelismos com transferência em cascata das cargas entres os alimentadores da RD para restaurar o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores;
- Modelagem dinâmica da rede com parâmetros reais da GD e seus controles, e presença de dispositivo Volt-Var;
- Estudo dos efeitos transitórios durante o paralelismo dos alimentadores sobre os elementos da rede, especialmente o gerador síncrono distribuído e seus sistemas de controle.

1.5 ORGANIZAÇÃO DE CAPÍTULOS

Este documento está organizado em cinco capítulos, referências bibliográficas e anexos. O capítulo 1 apresenta uma visão geral sobre as *smart grids* e a importância dos sistemas *self-healing* nos casos de contingência.

O Capítulo 2 apresenta a técnica de paralelismo de alimentadores radiais de redes de distribuição, os tipos de paralelismo e suas potencialidades associado ao conceito de reconfiguração automática de redes de distribuição. O capítulo descreve os transitórios eletromagnéticos decorrentes das manobras e os requisitos para sua operação em tempo real.

No Capítulo 3 é descrita a metodologia proposta, incluindo a função objetivo, as restrições e a sequência de manobras para execução dos paralelismos nas redes de distribuição em situação de contingência. Neste capítulo ainda é apresentada a modelagem dos componentes do sistema elétrico no programa ATPDraw.

O Capítulo 4 apresenta a rede de distribuição em estudo, bem como os resultados obtidos com a aplicação da metodologia em um estudo de caso. Neste capítulo é realizada a análise dos transitórios decorrentes dos chaveamentos e das restrições técnicas.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho, as publicações desenvolvidas ao longo do mestrado e algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 PARALELISMO DE ALIMENTADORES EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

Neste capítulo será apresentada a técnica de paralelismo de alimentadores. O capítulo foi dividido em quatro partes de modo a facilitar o seu entendimento. Inicialmente, é apresentado o conceito de paralelismo, bem como os três tipos possíveis (paralelismo de alimentadores derivados do mesmo transformador e subestação; de transformadores diferentes e mesma subestação; e de transformadores e subestações diferentes). Em seguida, o capítulo apresenta os transitórios eletromagnéticos causados pela comutação dos dispositivos na rede, classificando-os conforme a literatura, em impulsivos e oscilatórios.

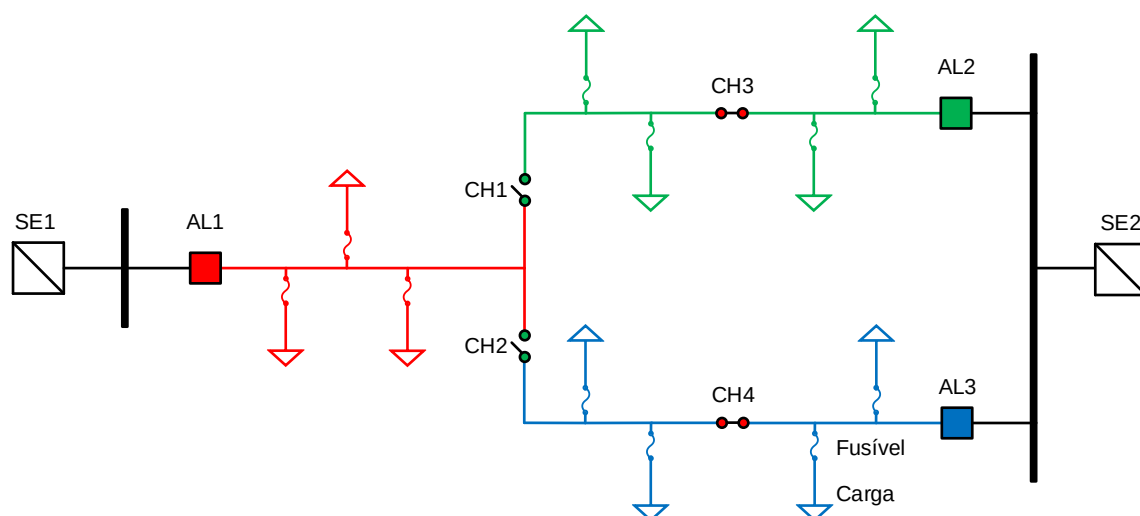
A seção 3 deste capítulo descreve a utilização da técnica de paralelismo em regime normal de operação, desligamentos programados e situações de contingência, sendo este último caso o foco do estudo deste trabalho. Finalmente, na última seção, são apresentados os requisitos necessários para realização do paralelismo em tempo real, especialmente no contexto de *self-healing*.

2.1 CARACTERÍSTICAS E TIPOS DE PARALELISMO

As redes de distribuição (RDs) de energia elétrica normalmente operam de forma radial por questões de proteção e segurança operativa (BERNARDON, 2007). No entanto, essa característica das redes diminui a confiabilidade do sistema de distribuição (SD) em relação ao fornecimento de energia, visto que na ocorrência de qualquer defeito no alimentador principal todas as cargas consumidoras são desligadas (BORGES, 2013).

Por isso, embora as RDs normalmente operem com uma topologia radial, o SD geralmente apresenta uma estrutura de rede em malha (XIAOMING et al., 2018), o que permite transferir blocos de carga entre seus alimentadores ligando a rede temporariamente em anel (BERNARDON; VEIGA, 2007; PFITSCHER et al., 2012a). A reconfiguração da RD ocorre através da abertura ou fechamento de dispositivos de proteção e manobra, por exemplo, religadores automáticos ou chaves (CHs) seccionadoras presentes na rede, conforme ilustra a Figura 2.1.

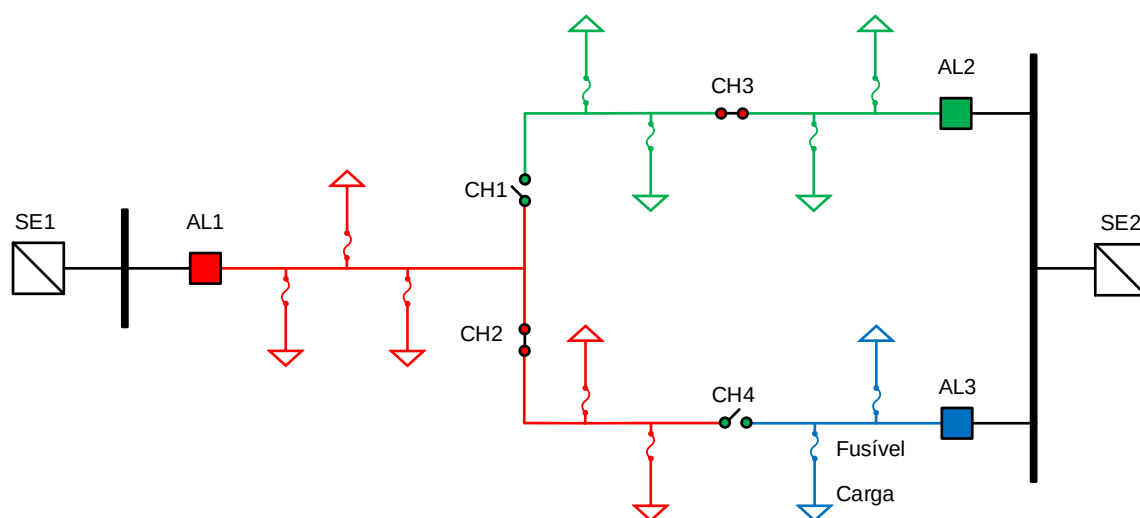
Figura 2.1 – Rede de distribuição radial com possibilidade de alteração da topologia.



Fonte: Próprio autor.

Se num instante t a chave 2 (CH2) normalmente aberta (NA) da RD da Figura 2.1 for fechada, o alimentador 1 (AL1) da subestação 1 (SE1) estará em paralelo com o AL3 de SE2. Em seguida, ao abrir a CH4 normalmente fechada (NF), verifica-se que parte das cargas de AL3 foram transferidas para AL1. Esse processo de reconfiguração da RD com transferências de carga, onde os alimentadores são temporariamente colocados em paralelo, é conhecido como **paralelismo**.

Figura 2.2 – RD após o paralelismo de AL1 e AL3.



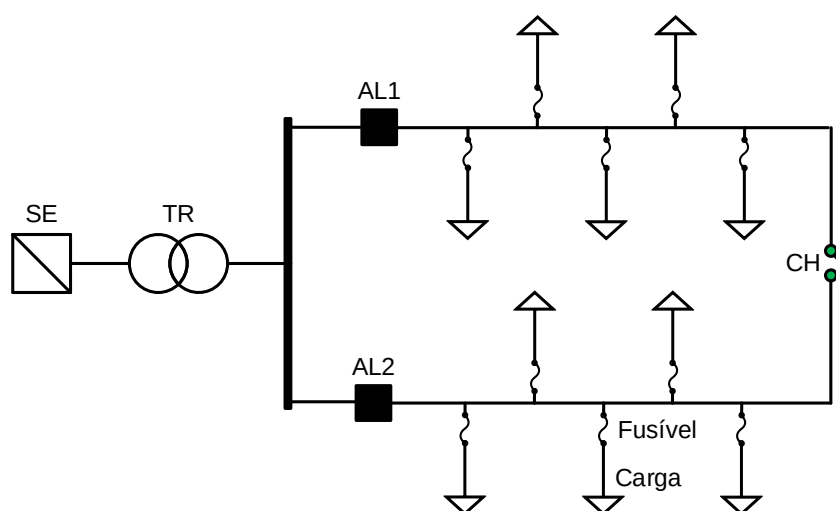
Fonte: Próprio autor.

Durante a comutação dos equipamentos da rede para a realização do paralelismo, o SD está sujeito a elevações transitórias nos seus níveis de tensão e corrente que podem ultrapassar os limites de operação. Por isso, é fundamental que sejam realizados estudos a fim de verificar sua viabilidade técnica e operacional (BERNARDON et al., 2006; SANTOS, 2008). Não havendo violação de nenhuma restrição, as cargas do SD podem ser redistribuídas entre seus alimentadores sem que haja o desligamento de consumidores, que estão mais exigentes com relação a qualidade e continuidade do serviço (GARCIA, 2015).

Os trabalhos de (CHEN et al., 2004; HUANG et al., 2002; SANTOS, 2008, 2013; SOARES, 2012) apresentam os três tipos de paralelismo em função da localização e da derivação dos ALs.

• Paralelismo do Tipo I

Este tipo de paralelismo é o mais executado pelas concessionárias, pois é o mais simples (SOARES, 2012), e se caracteriza pelos alimentadores derivarem do mesmo transformador (TR) e se localizarem na mesma subestação, conforme apresenta a Figura 2.3.



Fonte: Adaptado de (SOARES, 2012, p. 40).

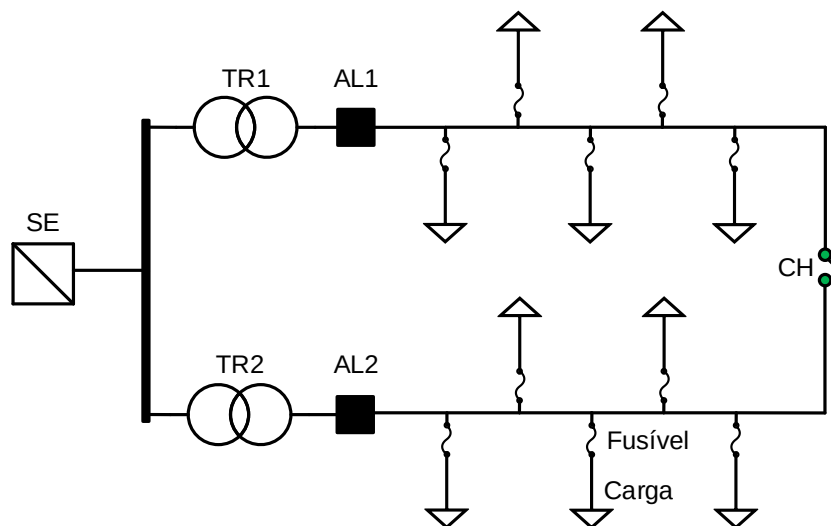
Nesta configuração, deve-se atentar para as bitolas dos condutores (os condutores de ambos os alimentadores ligados em paralelo devem possuir

capacidade de corrente suficiente para conduzir as cargas neles conectados), carregamentos da rede (SOARES, 2012), comprimento dos alimentadores (garantir queda de tensão aceitável no final do alimentador), distribuições e características das cargas ao longo dos alimentadores (CHEN et al., 2004; SANTOS, 2008). Além disso, as chaves de manobra devem estar com a mesma sequência de fases.

• Paralelismo do Tipo II

Neste tipo de paralelismo os alimentadores derivam de diferentes transformadores, e estão localizados na mesma subestação (HUANG et al., 2002), conforme mostra a Figura 2.4.

Figura 2.4 – Paralelismo do tipo II: ALs derivados de transformadores diferentes.



Fonte: Adaptado de (SOARES, 2012, p. 41).

Esta configuração é mais complexa que a anterior (HUANG et al., 2002), pois além das condições inerentes a realização do paralelismo do tipo I, ainda devem ser observadas a diferença de capacidade, as impedâncias, o carregamento, a característica de carga e o posicionamento do seletor de TAPs de ambos os transformadores da subestação (SANTOS, 2008).

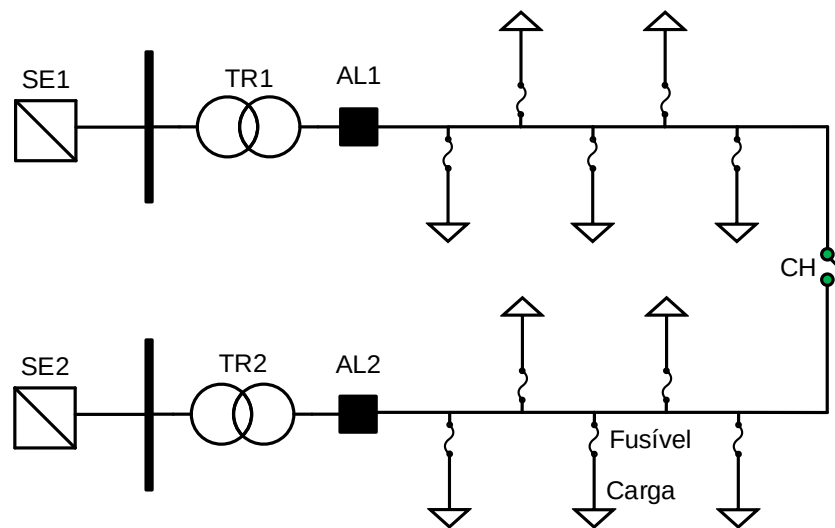
Santos (2008) e Soares (2012) destacam ainda que um problema operacional que pode surgir no paralelismo de alimentadores do tipo II é o caso de um mau fechamento de uma das fases da chave de manobra, pelo qual a chave passa a ser vista como uma resistência de contato elevado o que ocasiona um aquecimento

danoso a este dispositivo. Por isso, as chaves de manobra devem estar com a mesma sequência de fases.

- **Paralelismo do Tipo III**

Este arranjo apresenta alimentadores derivados de transformadores e subestações diferentes, conforme apresentado na Figura 2.5. É a pior configuração em anel para o paralelismo de alimentadores (HUANG et al., 2002; SANTOS, 2008).

Figura 2.5 – Paralelismo do tipo III: ALs derivados de diferentes transformadores e subestações.



Fonte: Adaptado de (SOARES, 2012, p. 42).

Para esta configuração de paralelismo, além das observações registradas para os tipos I e II, o estudo deve considerar a capacidade de curto-circuito, o nível de tensão das subestações, a tensão e o ângulo de fase das linhas de transmissão que alimentam as subestações (CHEN et al., 2004; SANTOS, 2008).

Essa manobra é evitada não só pelo conservadorismo das concessionárias, mas também pelos altos riscos eminentes, visto que as subestações não têm seus equipamentos padronizados, possuindo carregamentos diferentes para os transformadores, alimentadores com cargas variadas, entre outros (SANTOS, 2008). Ainda segundo este autor, para uma defasagem angular maior que três graus, não se deve executar qualquer manobra de paralelismo, pois o nível de tensão entre os dois pontos da chave de uma mesma fase pode provocar sobrecorrentes prejudiciais ao

equipamento além do risco de provocar acidentes. Esta restrição também é adotada no estudo de outros autores como (GARCIA, 2015; GARCIA et al., 2013; OLIVEIRA; PEREIRA; RESENER, 2018; ORTIZ et al., 2018; PFITSCHER, 2013; PFITSCHER et al., 2013b; TESAROVA; VYKUKA, 2018).

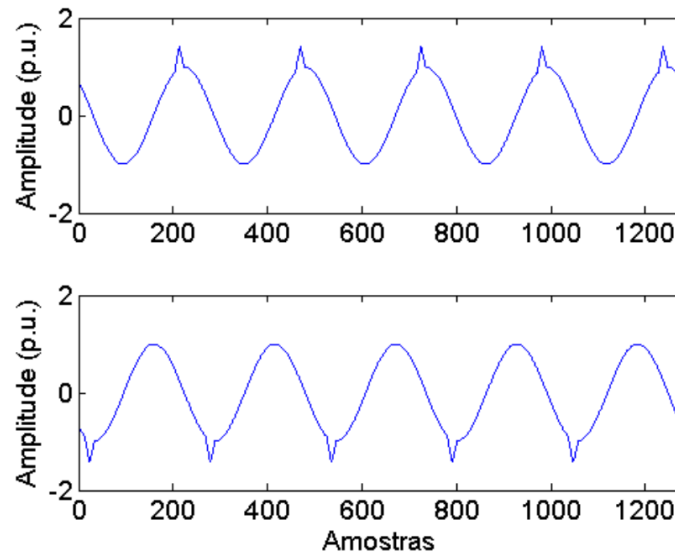
2.2 TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Os transitórios do sistema elétrico são eventos de curta duração originados por diversos fatores, por exemplo, descargas atmosféricas, energização de bancos de capacitores, alteração da topologia da rede pela comutação de equipamentos, chaveamento de cargas, partida de motores, curto-circuito, entre outros (KRÄULICH, 2016). Os autores Paulillo; Teixeira; Bacca (2013) referem-se aos transitórios eletromagnéticos como “as manifestações ou respostas elétricas locais ou nas adjacências, oriundas de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica”. Os estudos de transitório eletromagnético são muito importantes e necessários para o planejamento de um sistema elétrico, pois durante a sua ocorrência são verificadas as maiores solicitações de tensão e/ou corrente no sistema (KRÄULICH, 2016).

O Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*) possui a norma IEEE Standard (Std.) 1159 (2009), que aborda de maneira bem detalhada os fenômenos eletromagnéticos em sistemas de energia, abrangendo desde as definições, causas e consequências para as fontes e cargas, até técnicas de medição, monitoramento, e interpretação de resultados. Esta norma, bem como outros autores da literatura, classificam os transitórios como impulsivos ou oscilatórios.

Os transitórios impulsivos são caracterizados em função de seus tempos de subida e decaimento (IEEE STD 1159TM, 2009) e pela rápida alteração no regime permanente da tensão e/ou da corrente do sistema que pode desencadear um impulso unidirecional positivo ou negativo nestas formas de onda (FERREIRA, 2010a). Esses transitórios são de alta frequência e, em geral, rapidamente amortecidos pelos demais componentes do sistema (PAULILLO; TEIXEIRA; BACCA, 2013). As descargas atmosféricas são exemplos de transitórios impulsivos (IEEE STD 1159TM, 2009). A Figura 2.6 ilustra um transitório impulsivo.

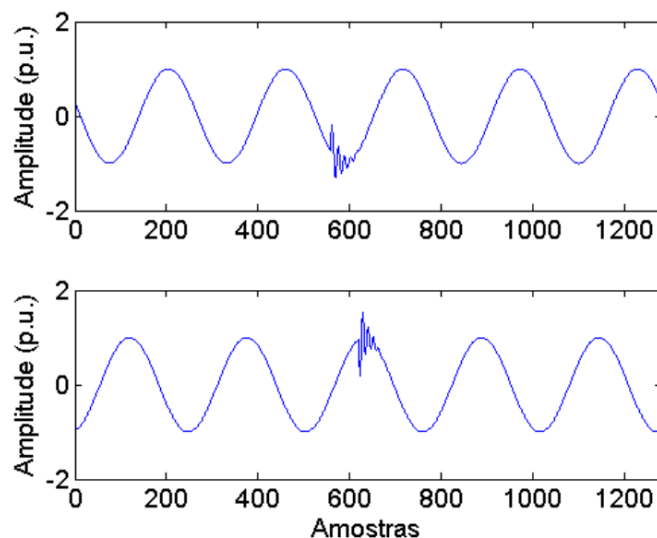
Figura 2.6 – Representação de transitórios impulsivos.



Fonte: (FERREIRA, 2010, p. 11).

Nos transitórios oscilatórios, assim como nos impulsivos, os níveis de tensão e/ou corrente também alteram suas polaridades em valores positivos ou negativos (ARRUDA, 2003; FERREIRA, 2010a). No entanto, eles se caracterizam pelo “seu conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão” (PAULILLO; TEIXEIRA; BACCA, 2013). Os transitórios oscilatórios são normalmente causados por chaveamentos, ou decorrentes de ressonâncias associadas a algum transitório impulsivo (ARRUDA, 2003; IEEE STD 1159TM, 2009).

Figura 2.7 – Representação de transitórios oscilatórios.



Fonte: (FERREIRA, 2010, p. 12).

Neste trabalho em específico o objetivo é analisar os transitórios decorrentes dos chaveamentos para realização do paralelismo com transferências de carga em uma RD, pois se não observados eles podem danificar equipamentos ou provocar a atuação indesejada de dispositivos de proteção (PFITSCHER et al., 2013b). Os transitórios oscilatórios originados pelos chaveamentos em um sistema elétrico podem causar, dentre outros, elevações e afundamentos nos níveis de tensão e corrente, distorções harmônicas (ruídos) nas formas de onda ou ainda variações de frequência (IEEE STD 1159TM, 2009). No Brasil, o Módulo 8 do PRODIST, que trata da qualidade da energia elétrica, também caracteriza estes fenômenos na sua seção 8.1 sobre a qualidade do produto, estabelecendo os indicadores e limites de referência, metodologia de medição para a tensão tanto em regime permanente quanto durante as perturbações (ANEEL, 2019).

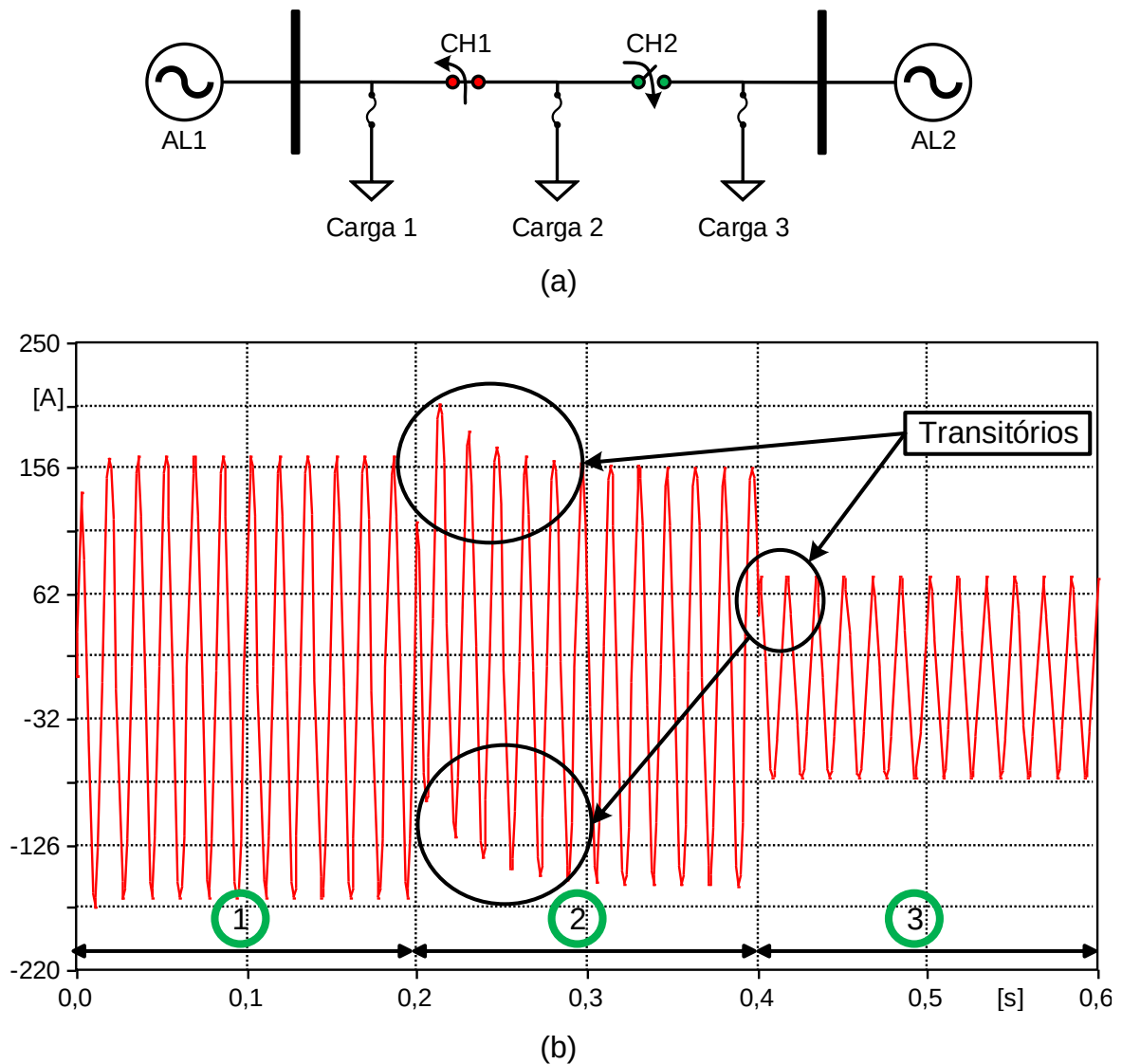
Os transitórios eletromagnéticos originados por chaveamentos na RD ocorrem principalmente devido às características reativas dos elementos na rede, como as indutâncias das linhas, cargas indutivas e capacitivas e os bancos de capacitores (PFITSCHER et al., 2013b). Isso está relacionado ao fato de elementos capacitivos possuírem uma inércia a variação instantânea da tensão, da mesma forma que os indutivos se opõem a variações da corrente.

No caso do paralelismo de alimentadores, durante as manobras de abertura e fechamento das chaves para transferência da carga, o balanceamento entre as duas extremidades da chave não ocorre de maneira instantânea. Desta forma, durante o regime transitório, uma chave NA em processo de fechamento, pode ter um dos seus lados submetido a valores altos de corrente se comparado ao regime permanente (PFITSCHER, 2013). De forma análoga, durante a abertura de uma chave NF pode surgir uma tensão sobre a chave devido ao carregamento da capacitância formada na chave e à formação de arco elétrico (GARCIA, 2015). Para evitar danos à rede em função do arco elétrico, tecnologias de controle são utilizadas para garantir sua rápida extinção como óleo mineral, ar comprimido, vácuo e SF₆.

Para ilustrar os fenômenos transitórios, que podem ocorrer durante os chaveamentos do paralelismo, a Figura 2.8(a) apresenta uma RD com dois alimentadores, onde a carga 2 será transferida de AL1 para AL2 através do fechamento de CH2 (NA) em $t = 0,2$ s e abertura de CH1 (NF) em $t = 0,4$ s. Os

transitórios eletromagnéticos na forma de onda da corrente de AL1 são apresentados na Figura 2.8(b), na qual é possível visualizar os três modos de operação da rede: (1) RD antes do paralelismo; (2) fechamento de CH2 e início do paralelismo; e (3) abertura de CH1 e finalização do paralelismo.

Figura 2.8 – Transitórios eletromagnéticos durante o paralelismo em uma RD.

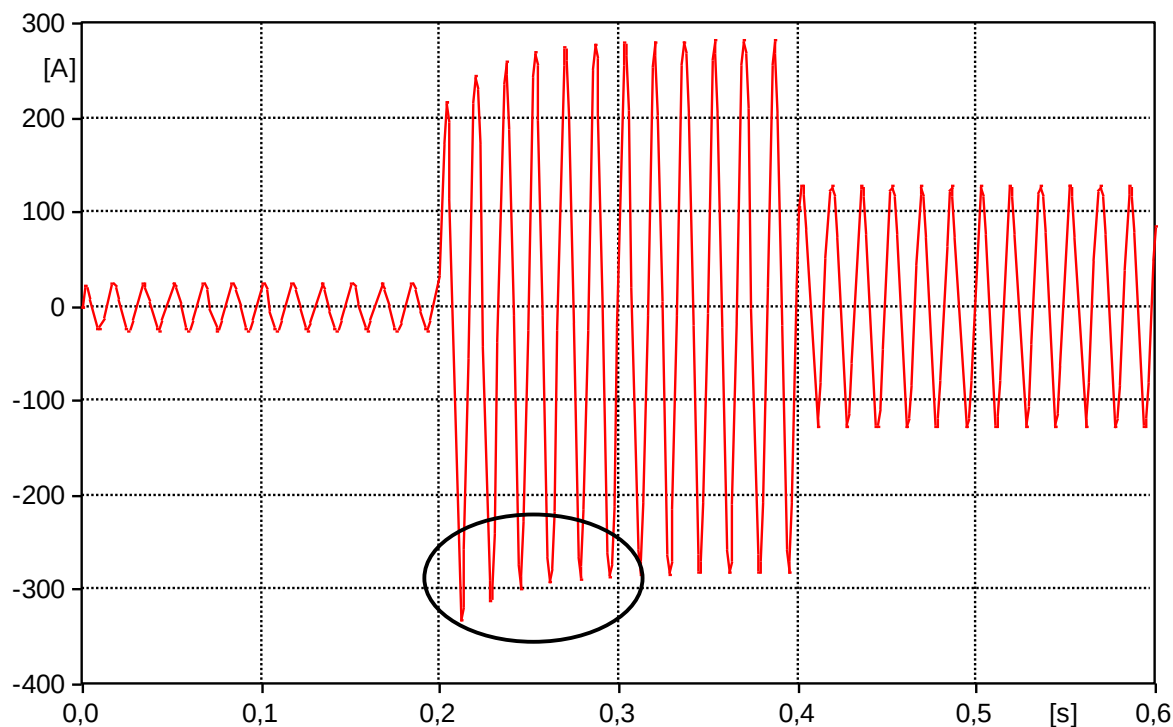


Fonte: Adaptado de PFITSCHER (2013, p. 76).

A diferença de fase entre as tensões dos alimentadores também pode causar um aumento significativo nos transitórios de tensão e corrente (PFITSCHER et al., 2013b), conforme ilustra a Figura 2.9. Desta forma, monitorar o estado da rede para comandar a abertura e fechamento dos equipamentos de manobra, quando os

circuitos de ambos os alimentadores colocados em paralelo estiverem nos limites desejados de frequência e ângulo de fase, ajuda a atenuar os transitórios.

Figura 2.9 – Efeito da diferença de fase no transitório de corrente de um alimentador.

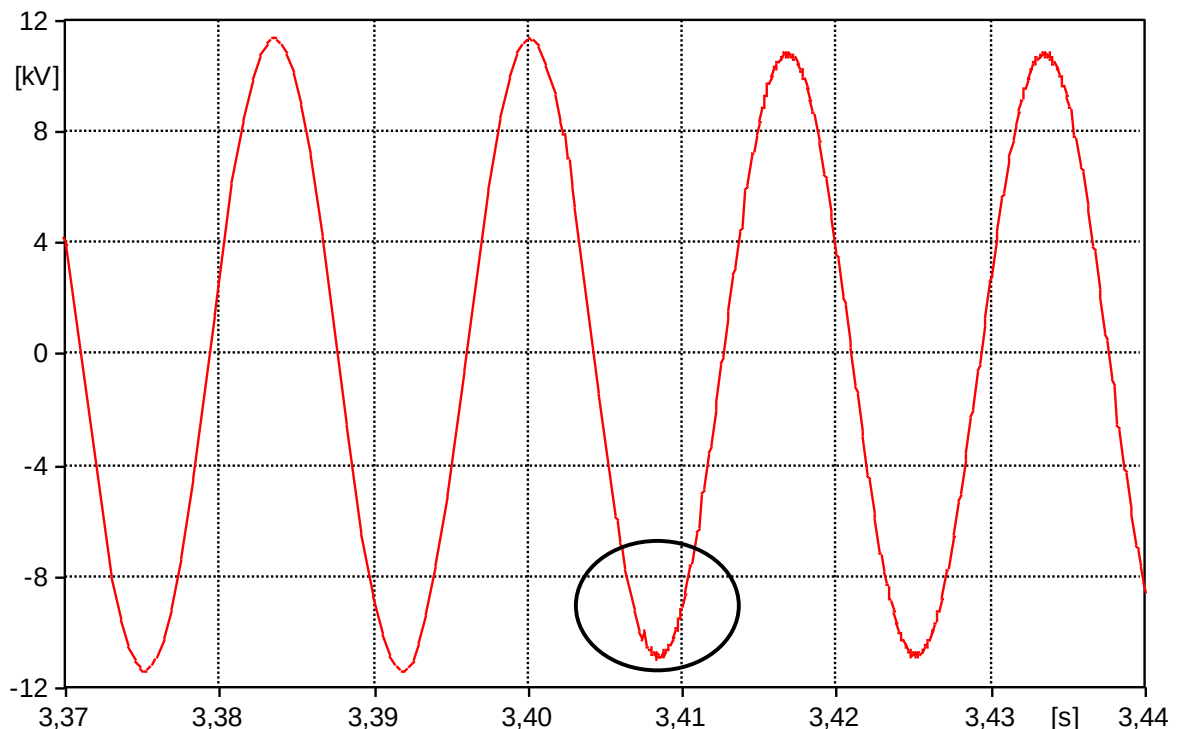


Fonte: Próprio autor.

O instante de comutação dos equipamentos também influencia nos transitórios eletromagnéticos, por isso, o ideal é que as operações de comutação das chaves sejam realizadas simultaneamente nas três fases. Todavia, na prática, em função da dispersão mecânica esse procedimento raramente ocorre ao mesmo tempo, o que pode originar o arco elétrico durante as manobras (GARCIA, 2015).

A presença de dispositivos de controle Volt-Var na RD, como banco de capacitores ou reguladores de tensão, também potencializa os transitórios eletromagnéticos decorrentes dos chaveamentos durante o paralelismo. Os surtos são comumente observados na tensão desses dispositivos em função da frequência de ressonância natural entre elementos indutivos e capacitivos (PFITSCHER, 2013). A Figura 2.10 ilustra um transitório oscilatório de tensão em um banco de capacitores de uma RD. Essas oscilações duram normalmente alguns ciclos da frequência fundamental e são amortecidas pelos componentes resistivos presentes na rede (GARCIA, 2015; PFITSCHER et al., 2013b).

Figura 2.10 – Oscilação transitória na tensão de um banco de capacitores.



Fonte: Próprio autor.

Conforme apresentam os trabalhos de (GARCIA, 2015; PFITSCHER, 2013), o carregamento, a relação X/R das impedâncias das linhas e o perfil das cargas (predominantemente resistivas ou indutivas) também interferem nos transitórios durante o paralelismo. Ambos os autores, a partir de uma análise sensível variando esses parâmetros nas suas RDs em estudo, apresentam gráficos que relacionam a corrente de pico no paralelismo e seu valor em regime permanente.

Em geral, com o aumento dessa variação o comportamento da sobrecorrente nos alimentadores ligados em paralelo tende a se tornar mais significativo. No entanto, ressalta-se que esta tendência de comportamento levantada varia de acordo com os parâmetros da rede (impedância das redes e cargas, por exemplo). Desta forma, o mesmo sistema elétrico está sujeito a diferentes transitórios eletromagnéticos que dependem de seus parâmetros e de sua configuração no momento da realização dos chaveamentos.

2.3 PARALELISMO NO CONTEXTO DE *SELF-HEALING*

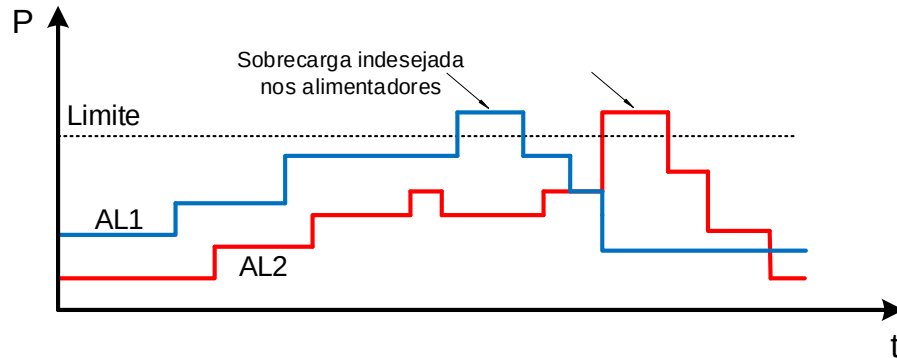
A topologia das RDs é alterada devido a necessidades operativas do sistema por meio da abertura ou fechamento de dispositivos de proteção ou manobra em três situações: regime normal de operação, desligamentos programados ou contingências. Em uma *smart grid*, a reconfiguração automática é uma das características mais importantes (BERNARDON et al., 2015). Nesse contexto, a técnica de paralelismo pode ser utilizada para modificar a topologia da rede transferindo cargas entre alimentadores sem que haja a necessidade de desligamentos durante os chaveamentos (PFITSCHER et al., 2012b).

Em *regime normal de operação*, as manobras de reconfiguração são realizadas para melhorar o desempenho da rede, como balancear as cargas dos alimentadores, reduzir perdas, melhorar os níveis de tensão e os indicadores de qualidade do SD. Nesse contexto, as *smart grids* devem ser capazes de determinar automaticamente qual a melhor topologia para operação da rede relacionando diferentes possibilidades de geração e consumo em um período. Além disso, a execução das manobras também deve ser automática por meio do acionamento de dispositivos telecomandados (BERNARDON et al., 2015).

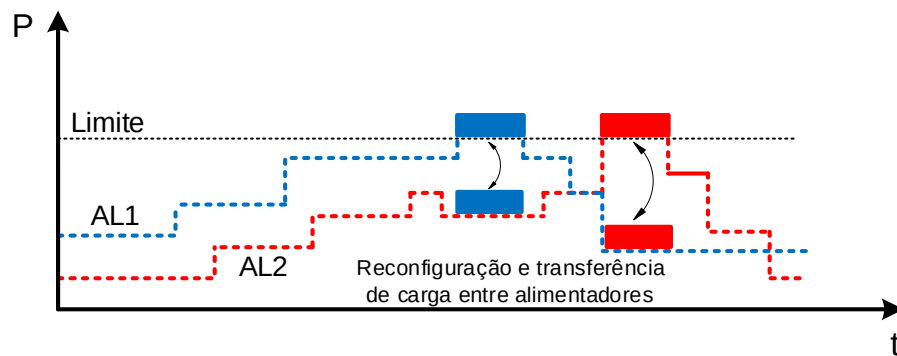
O trabalho de (SPERANDIO, 2008) apresenta um cenário com dois alimentadores: um de perfil residencial (maior demanda entre 18h e 22h) e outro comercial (maior demanda entre 8h e 19h). O paralelismo é utilizado para redistribuir as cargas desses alimentadores ao longo do dia: durante o dia o alimentador residencial recebe parte da carga do comercial, e à noite parte da carga residencial é transferida para o alimentador comercial que estará menos carregado.

Com isso, além de melhorar o carregamento dos alimentadores e reduzir as perdas, as subestações e alimentadores poderiam operar por um período maior sem a necessidade de um projeto de ampliação, mesmo ocorrendo um acréscimo na carga instalada. A Figura 2.11 ilustra essa situação: em (a) é verificada a situação de sobrecarga para a configuração original da rede e em (b) mostra-se a possibilidade de transferir parte das cargas entre os alimentadores para reduzir a sobrecarga e não ultrapassar o limite.

Figura 2.11 – Paralelismo de alimentadores para solucionar problema de sobrecarga na rede: (a) situação original; (b) reconfiguração da rede em regime normal de operação.



(a)



(b)

Fonte: Adaptado de (BERNARDON et al., 2015, p. 23).

Os *desligamentos programados* nas RDs ocorrem em função da necessidade da realização de obras de expansão, como recondutoramentos ou construção de novos alimentadores; ou manutenção preventiva, como substituição de postes, instalação ou manutenção de equipamentos de manobra ou de proteção. Nessas circunstâncias, o paralelismo pode ser utilizado mediante a uma análise preliminar de suas restrições técnicas buscando encontrar a melhor topologia para rede, manter o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores, reduzir o tempo da interrupção e priorizar cargas essenciais (hospitais, aeroportos, etc.) (BERNARDON et al., 2015).

Na RD, as intervenções não programadas e contingências acontecem em diferentes cenários causando prejuízos para a concessionária, tanto pelas perdas de faturamento em função da interrupção no fornecimento de energia quanto pelas

multas definidas pelo órgão regulador. Além disso, equipamentos podem ser danificados, comprometendo atividades essenciais e causando transtornos em hospitais e no trânsito, prejuízos na produção em indústrias e atividades comerciais, entre outros, o que gera muito desconforto e insatisfação aos clientes. Contudo, as interrupções são inevitáveis, o que exige soluções rápidas das concessionárias no restabelecimento de energia aos consumidores afetados através de manutenções corretivas no trecho e nos componentes da rede que foram afetados, o que coloca a rede em *condição de contingência* (BROWN, 2003; OLIVEIRA; PEREIRA; RESENER, 2018; ORTIZ et al., 2018).

Em uma RD em situação de contingência, deseja-se que a solução seja identificada rapidamente, restringindo ao mínimo a área desenergizada. Quanto mais ágil o restabelecimento de energia de um sistema, melhores serão os seus indicadores de qualidade do serviço (BERNARDON et al., 2015). Desta forma, quando ocorre uma falta permanente em um trecho qualquer de um alimentador, normalmente as seguintes ações são tomadas (BERNARDON et al., 2015; GARCIA, 2005):

- Identificar o local defeituoso;
- Restringir o local do defeito a menor área possível por meio da abertura de equipamentos de proteção e/ou de manobra;
- Buscar uma nova topologia para a RD, através de manobras nos equipamentos para estabelecer o suprimento para os consumidores desligados a montante e/ou a jusante da área defeituosa isolada;
- Reparar o defeito;
- Executar novas manobras para retornar a RD para o estado original.

Quando uma rede consegue se reconfigurar automaticamente e de maneira praticamente instantânea, detectando, analisando e isolando falhas, e restaurando de modo autônomo o serviço de energia elétrica a seus consumidores, diz-se que ela é dotada da característica de *self-healing*, ou seja, trata-se de uma rede “auto regenerável” ou “auto recuperável” (FALCÃO, 2010; WANG; WANG, 2015; YIP et al., 2017). Na literatura, os sistemas associados ao *self-healing* para localização automática da falha, isolamento e restauração do serviço são conhecidos como FLISR (do inglês, *Fault Location, Isolation and Service Restoration*) (YIP et al., 2017).

Além da conexão de sistemas de geração emergenciais, durante o processo de auto recuperação de uma RD em situação de contingência, o paralelismo de

alimentadores pode ser considerado como uma alternativa para reconfiguração da rede em tempo real, redistribuindo as cargas entre seus alimentadores, visando a restauração de energia ao maior número possível de consumidores que estejam fora do local do defeito (ORTIZ et al., 2018). A viabilidade dos paralelismos no processo de *self-healing* de uma RD afetada por uma falta permanente é o principal foco de pesquisa desse trabalho.

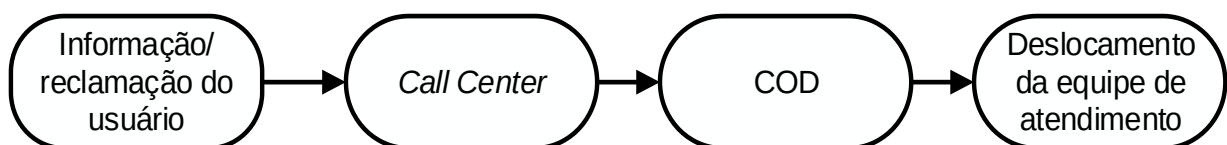
Redes inteligentes dotadas da capacidade de *self-healing* possuem como características fundamentais monitorar o sistema em tempo real, com possibilidade de tomada de decisão, previsão de possíveis perturbações que possam provocar distúrbios no sistema, bem como a capacidade de isolar partes do sistema defeituoso e restaurar o fornecimento de energia para partes não afetadas (FONSECA, 2017).

Entre os benefícios do uso do conceito de auto restabelecimento para redes elétricas, destacam-se a restauração da fonte de alimentação para a maioria das cargas afetadas, retorno ao regime normal de operação do sistema em um pequeno intervalo de tempo, e redução do envio de equipes de atendimento (FONSECA, 2017; MADANI et al., 2015). Com isso, percebe-se que em função do alto nível de tecnologia agregada, as redes inteligentes podem atender às demandas da sociedade moderna, tanto em termos de necessidades energéticas como de desenvolvimento sustentável (FALCÃO, 2010; STRASSER et al., 2015).

2.4 REQUISITOS PARA OPERAÇÃO EM TEMPO REAL

Nas RDs tradicionais, quando ocorre uma contingência no SD que provoca o desligamento dos consumidores o processo de restabelecimento de energia elétrica ocorre conforme apresenta a Figura 2.12.

Figura 2.12 – Processo tradicional de restabelecimento de energia.



Fonte: Próprio autor.

Os consumidores afetados pela falta informam a concessionária da situação de contingência e local do defeito geralmente por meio de telefonemas ou mensagem de texto ao *Call Center* (central telefônica) da concessionária. O *Call Center* recebe a informação e a repassa para o Centro de Operações da Distribuição (COD), que é o setor responsável por avaliar e estabelecer as ações a serem tomadas para restabelecer o serviço. Em empresas de pequeno porte, por exemplo, permissionárias, o mesmo atendente do *Call Center* pode ser o operador do COD.

Com as informações disponibilizadas pelos consumidores, o COD terá condições de identificar a abrangência da área afetada pela interrupção, e isolá-la a partir da reconfiguração da rede. Nesse processo muitas vezes as equipes de atendimento em campo necessitam percorrer a rede procurando o local do defeito, e as informações dos clientes são, por vezes, incertas.

A reconfiguração da rede segue normas técnicas da própria concessionária, e depende da análise de diversas variáveis (possíveis equipamentos como disjuntores, chaves, religadores, envolvidos no defeito, localização exata do defeito, trechos não afetados que podem ser restabelecidos, etc.) muitas vezes de difícil visualização pelo operador. Além disso, para um mesmo desligamento, múltiplas soluções são encontradas, sendo que para alguns casos, talvez nenhuma delas configure a solução ótima do problema. Compete ao operador a grande responsabilidade de encontrar a topologia que ele considere apropriada, fundamentando sua escolha em seus conhecimentos pessoais adquiridos pela sua experiência sobre a análise e o planejamento de ações corretivas.

Outro fator gerador de atrasos no processo de restauração da energia elétrica tradicional é o difícil acesso a zonas rurais e a dificuldade de locomoção em grandes centros urbanos. Desta forma, observa-se que este procedimento é impreciso e muito demorado, além de ser ineficiente, especialmente nos casos de contingência, onde se deseja agilidade no restabelecimento e, conseqüentemente, redução do impacto da interrupção de energia para os consumidores.

Esse processo dispendioso e pouco eficiente relatado acima pode ser agilizado no conceito de redes inteligentes dotadas da capacidade de *self-healing*. O desenvolvimento de novas tecnologias, como equipamentos de distribuição automatizados e sistemas eficientes de comunicação, permite que o restabelecimento da energia em situações de contingência ocorra de forma automática para parte das

áreas afetadas, reduzindo significativamente o tempo das interrupções (BERNARDON et al., 2015; PFITSCHER et al., 2013a; SPERANDIO, 2008).

A automatização do SD inicia com a instalação e utilização de equipamentos telecomandados, dentre os quais destacam-se as chaves seccionadoras, seccionalizadores e religadores automáticos. Esses equipamentos já estão sendo cada vez mais utilizados pelas concessionárias visto que nos últimos anos registrou-se uma redução significativa de seus custos (SANTO, 2018; SPERANDIO, 2008). A instalação destes equipamentos é importante para alterar a topologia da rede tanto em situações de contingência, isolando a falta e restabelecendo a energia para consumidores fora da zona defeituosa, quanto em regime normal de operação para melhorar o desempenho da rede, ou casos de desligamento programados.

Um SD inteligente também deve possuir infraestrutura de medição avançada (em inglês, *Advanced Metering Infrastructure – AMI*), que possibilite a medição automática de grandezas elétricas (tensões, correntes, fator de potência, etc.), comunicação direta do consumidor à distribuidora, monitoramento de eventos (como sub e sobretensões, interrupções, etc.), emprego de ações de resposta pelo lado da demanda e controle de carga dos consumidores (LOPES, 2014; SANTO, 2018).

A comunicação entre os equipamentos telecomandados e os dispositivos de medição e monitoramento deve ser segura e confiável com rápida velocidade e largura de banda para os cenários projetados, permitindo que as ações sejam tomadas remotamente de uma central de controle. No entanto, isso ainda é um desafio em função da necessidade de padronização dos protocolos e das interfaces entre os equipamentos para sua eficiente interoperabilidade, além da segurança das informações garantindo que a rede esteja livre de ataques e apenas agentes autorizados tenham acesso aos seus dados. Além disso, o gerenciamento deste grande volume de dados coletados envolve problemas de sincronização, compartilhamento, validação e arquivamento, detecção e rejeição de dados que não estejam corretos (BERNARDON et al., 2015; FARHANGI, 2017; MADANI et al., 2015).

Neste cenário, também destaca-se o desenvolvimento de sistemas computacionais SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), instalados localmente na subestação ou também no COD das concessionárias, para monitorar e controlar em tempo real todos os equipamentos telecomandados do SD com possibilidade de armazenamento do histórico de operações da rede em um banco de

dados (LOPES, 2014). Os programas SCADA desenvolvidos para SEPs podem incluir ainda Sistemas de Gerenciamento de Energia (EMS, *Energy Management Systems*) e Sistemas Avançados de Gerenciamento da Distribuição (ADMS, *Advanced Distribution Management Systems*), que agregam funcionalidades como cálculo do fluxo de potência, estimação de estados, controle de dispositivos da rede (chaves telecomandadas, banco de capacitores, etc.), análise de contingência, *self-healing*, entre outras (BERNARDON et al., 2015; FARHANGI, 2017; LEITE, 2015).

O processo de reconfiguração automática da rede em tempo real exige algoritmos de otimização que considerem as diversas variáveis envolvidas nesse processo, avaliando o peso que cada critério representa para agilizar a tomada de decisão. Para as reconfigurações em regime normal de operação, é importante que estas análises sejam feitas de forma dinâmica em função das variações nos níveis de geração e carga ao longo do dia, respeitando-se os limites técnicos e operacionais. Nos desligamentos programados, deve-se verificar a topologia que gera menor impacto aos clientes da região em manutenção, e garante melhores condições de operação para rede.

Nos casos de contingência, onde se deseja agilidade no processo de restabelecimento de energia e o número de variáveis observadas é ainda maior (isolar região do defeito, maximizar número de consumidores restabelecidos, priorizar componentes do SD com maior confiabilidade, realizar a reconfiguração com a menor quantidade de manobras, etc.) o processo de reconfiguração automática em tempo real se torna ainda mais complexo.

Em função desses diversos fatores e das especificidades de cada SD, os métodos de otimização para busca da melhor topologia de desempenho da rede são desenvolvidos baseados nas prioridades e objetivos estabelecidos pela concessionária, considerando o nível de automação, estrutura da rede, sistema SCADA, interoperabilidade dos equipamentos telecomandados, entre outros (FERREIRA, 2010b).

Segundo Mello (2014), os métodos de otimização para resolver o problema de reconfiguração de RDs vêm sendo discutidos há bastante tempo, e podem ser categorizados em heurística, meta-heurística, sistemas especialistas e programação matemática. Além desta classificação, o agrupamento dos métodos também pode ser baseado em conhecimento (heurística, especialista, lógica *Fuzzy*, entre outros) ou em

modelos físicos ou biológicos (algoritmos genéticos, busca tabu, enxame de partículas, outras meta-heurísticas).

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente capítulo apresentou no que consiste a técnica de paralelismo, isto é, o fechamento provisório da rede em anel para transferência de carga sem que haja desligamento de consumidores, bem como seus três tipos. O paralelismo do tipo I (alimentadores ligados em anel derivados do mesmo transformador e subestação) será considerado nas análises deste trabalho. O paralelismo do tipo II é raramente realizado pelas concessionárias, e o do tipo III normalmente é evitado.

Verificou-se também que durante a comutação dos dispositivos na RD, podem surgir transitórios eletromagnéticos oscilatórios, que inviabilizam a manobra de paralelismo. Esses transitórios se caracterizam por variações nos níveis de tensão e/ou corrente que, dependendo da magnitude, podem danificar equipamentos da rede ou provocar a atuação indesejada de dispositivos de proteção.

No processo de reconfiguração de RDs, os paralelismos podem ser realizados tanto em regime normal de operação, desligamentos programados ou em condição de contingência. Para este último caso, foco de estudo deste trabalho, a técnica de paralelismo é utilizada para restabelecer o fornecimento de energia elétrica ao maior número possível de consumidores sem que haja novos desligamentos na rede.

Para que uma RD seja colocada em anel, e os paralelismos ocorram em tempo real, é necessário que a rede seja inteligente, e equipada com tecnologia de informação e comunicação para leitura e controle das variáveis da rede, além da presença de equipamentos automatizados para realização das manobras de forma remota, e algoritmos de otimização para auxiliar na definição da melhor topologia (BERNARDON et al., 2015; PFITSCHER, 2013; SPERANDIO, 2008).

No contexto das *smart grids*, a técnica de *self-healing* (auto recuperação da rede) é possível em virtude da inserção de novas tecnologias de supervisão, automação e controle na RD, apresentando-se como uma solução para que as concessionárias obtenham tempos de restabelecimento de energia adequados e atendam o maior número possível de cargas em situação de contingência

3 METODOLOGIA PROPOSTA

Neste capítulo é apresentada a metodologia proposta para *self-healing* da rede de distribuição (RD). Inicialmente, é exposta a formulação do problema, que consiste em estudos para analisar a viabilidade técnica e operacional dos paralelismos entre alimentadores com sucessivas transferências de carga no processo de auto reconfiguração da rede em condição de contingência. Com isso, é definida a função objetivo e são apresentadas as restrições consideradas, bem como a sequência de manobras dos elementos comutáveis da rede.

O capítulo apresenta ainda a modelagem dos componentes de sistemas elétricos no programa ATPDraw, utilizado para as análises do estudo de casos. A metodologia proposta neste trabalho é uma evolução dos estudos de Santos (2008, 2013), Pfitscher (2013) e Garcia (2015) ao contemplar os estudos de paralelismo com consecutivas transferências paralelas da carga na RD na presença de geradores síncronos distribuídos, incluindo como contribuição o efeito sobre seus reguladores de tensão e velocidade, e dispositivos de controle Volt-Var.

3.1 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A operação do SD está constantemente suscetível a contingências, como faltas permanentes, falhas de equipamentos, atuação indevida de proteções, desgaste de equipamentos, entre outros. Nestes casos quando os equipamentos instalados no sistema não conseguem restabelecer o serviço automaticamente, é necessária intervenção das equipes para realizar as manutenções corretivas no local.

Conforme já mencionado, uma RD dotada da capacidade de *self-healing* pode se auto reconfigurar buscando garantir o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores, além de minimizar a zona defeituosa e o tempo da interrupção. Durante o processo de reconfiguração, trechos da rede podem ser fechados em anel para realização do paralelismo de alimentadores com transferências de cargas sem que haja o desligamento de novos clientes. Após a correção do defeito pela concessionária a rede pode retornar a sua configuração inicial.

Neste sentido, a proposta deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia para análise da viabilidade técnica e operacional dos paralelismos para o restabelecimento de energia elétrica através de sucessivas transferências em paralelo das cargas entre os alimentadores de uma RD. Essas transferências paralelas consistem em aliviar parte da carga do alimentador que vai receber o bloco de cargas representado pelos consumidores afetados por uma interrupção no seu fornecimento de energia, mas que estão fora da zona de defeito, para outro alimentador da rede menos carregado.

Para isso, é fundamental verificar se os chaveamentos dos equipamentos telecomandados durante a realização das manobras não gerarão transitórios eletromagnéticos indesejados que violem os limites de carregamento, tensão e proteção do sistema. Com a aplicação desta técnica, pretende-se reconfigurar a rede em tempo real de forma a atender o maior número de consumidores e diminuir o tempo de interrupção, garantindo maior confiabilidade ao SD nos casos de contingência.

Além da análise desta particularidade (transferir paralelamente as cargas entre os alimentadores da RD para restaurar o fornecimento de energia), este trabalho também considera a expansão da GD e a presença de dispositivos de controle Volt-Var nas RDs. Por isso, é modelado um gerador síncrono distribuído com seus respectivos controles de tensão e velocidade, e um banco de capacitores. Assim, por meio de estudos mais realísticos e dinâmicos, pretende-se verificar o impacto operacional das manobras de paralelismo em possíveis cenários futuros nas *smart grids* durante as reconfigurações e *self-healing*.

3.1.1 Função objetivo e restrições

O objetivo da reconfiguração da RD em situação de contingência visa alimentar o número máximo possível de consumidores desatendidos que foram afetados por uma falta permanente no SD. As restrições consideradas nesse processo levam em conta os indicadores de qualidade da energia determinados no PRODIST, os limites operacionais dos elementos do sistema e seus ajustes de proteção.

A seguir são apresentadas a função objetivo e as restrições consideradas nas análises deste trabalho.

Função objetivo

- Maximização do número de consumidores restabelecidos pela falta, dada por:

$$fo = \max N_{CR} = \sum_{k=1}^{N_{TR}} C_k \quad (3.1)$$

onde N_{CR} é o número de consumidores restabelecidos, k é o índice do transformador de distribuição, N_{TR} é o número total de transformadores de distribuição restabelecidos, e C_k é o número de consumidores restabelecidos do transformador k .

Restrições

- **Níveis de tensão**

Para garantir a qualidade no fornecimento de energia aos consumidores, as tensões nodais máximas e mínimas devem estar de acordo com a equação (3.2).

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (3.2)$$

Onde V_i é a tensão em regime permanente em cada nó da rede considerando o intervalo de valores admissíveis ($V_{\min} = 0,93$ p.u. e $V_{\max} = 1,05$ p.u.). Os valores foram definidos de acordo com o PRODIST módulo 8, na faixa de 1 kV até 69 kV (ANEEL, 2019).

- **Níveis de sobrecarga**

Durante as transferências de carga, os limites de corrente nos elementos da rede elétrica devem apresentar valores inferiores ao seu limite operacional, conforme apresenta a equação (3.3).

$$I_{ij} \leq I_{ij,\max} \quad (3.3)$$

Onde $I_{ij,\max}$ é a corrente máxima admissível do equipamento ou condutor no ramo “ $i - j$ ” da rede, e I_{ij} é a corrente que efetivamente percorre o equipamento ou condutor.

- **Ajustes de proteção**

Os ajustes de proteção estabelecidos para os relés de sobrecorrente instalados ao longo da rede não devem ser violados. Neste trabalho, os equipamentos de proteção dos elementos do circuito estão ajustados para operarem com o equivalente a 90% de sua capacidade máxima de corrente ($I_{ij,prot}$), conforme apresenta a equação (3.4).

$$I_{ij} \leq I_{ij,prot} \quad (3.4)$$

- **Diferença de ângulo no ponto de interligação entre alimentadores**

Nas análises consideradas neste trabalho, a diferença de ângulo ($\Delta\varphi_{ij}$) das chaves de interligação (normalmente aberta – NA) manobradas durante o paralelismo deve ser inferior a 3° (BERMAN; MARKUSHEVICH, 2010; PFITSCHER, 2013; SANTOS, 2008; TESAROVA; VYKUKA, 2018).

- **Diferença de tensão no ponto de interligação entre alimentadores**

A diferença de tensão (ΔV_{ij}) medida entre os terminais a montante e a jusante da chave de interconexão NA antes do paralelismo deve ser menor que 1 kV (PFITSCHER, 2013; SANTOS, 2013).

As restrições de diferença de ângulo e de tensão das chaves seccionadoras (NA) evitam que surjam transitórios eletromagnéticos que provoquem sobretensões durante o seu fechamento para realização dos paralelismos. Além disso, outro efeito indesejável como o arco elétrico também deve ser evitado. No entanto, conforme os trabalhos de (OLIVEIRA; PEREIRA; RESENER, 2018; SANTOS, 2013), caso essa diferença angular ou de tensão sejam maiores que estes limites típicos para a realização do paralelismo de alimentadores, sua realização ainda assim pode ser avaliada pela concessionária, dependendo do local e das condições físicas e de operação destes equipamentos de manobra.

- **Banco de capacitores**

Segundo a NBR 5282 (1998), os capacitores projetados conforme esta norma podem operar com até 110% da tensão nominal (V_n), durante um período de 12 h em um dia. Nessas condições, a tensão de pico (incluindo todas as suas distorções harmônicas) não pode exceder $1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot V_n$, e a potência máxima deve estar limitada em 144% da potência nominal.

A norma ainda determina que os capacitores devem suportar constantemente correntes de valor eficaz 1,31 multiplicado a corrente nominal (I_n), desconsiderando os transitórios. Como o valor real da capacitância pode ser de até 1,10 multiplicado pela capacitância nominal, a máxima corrente permissível tolerada é $1,44 \cdot I_n$. Estes valores de sobrecorrente devem considerar efeitos combinados dos harmônicos e das sobretensões de até $1,10 \cdot V_n$ (ABNT, 1998).

- **Potência ativa e reativa da geração distribuída**

Os valores potência ativa ($P_{GD,k}$) e reativa ($Q_{GD,k}$) do gerador distribuído k devem respeitar seus limites operacionais, ou seja, a potência aparente verificada ($S_{GD,k}$) não pode ultrapassar a potência nominal aparente ($S_{GD,n}$) da GD considerada.

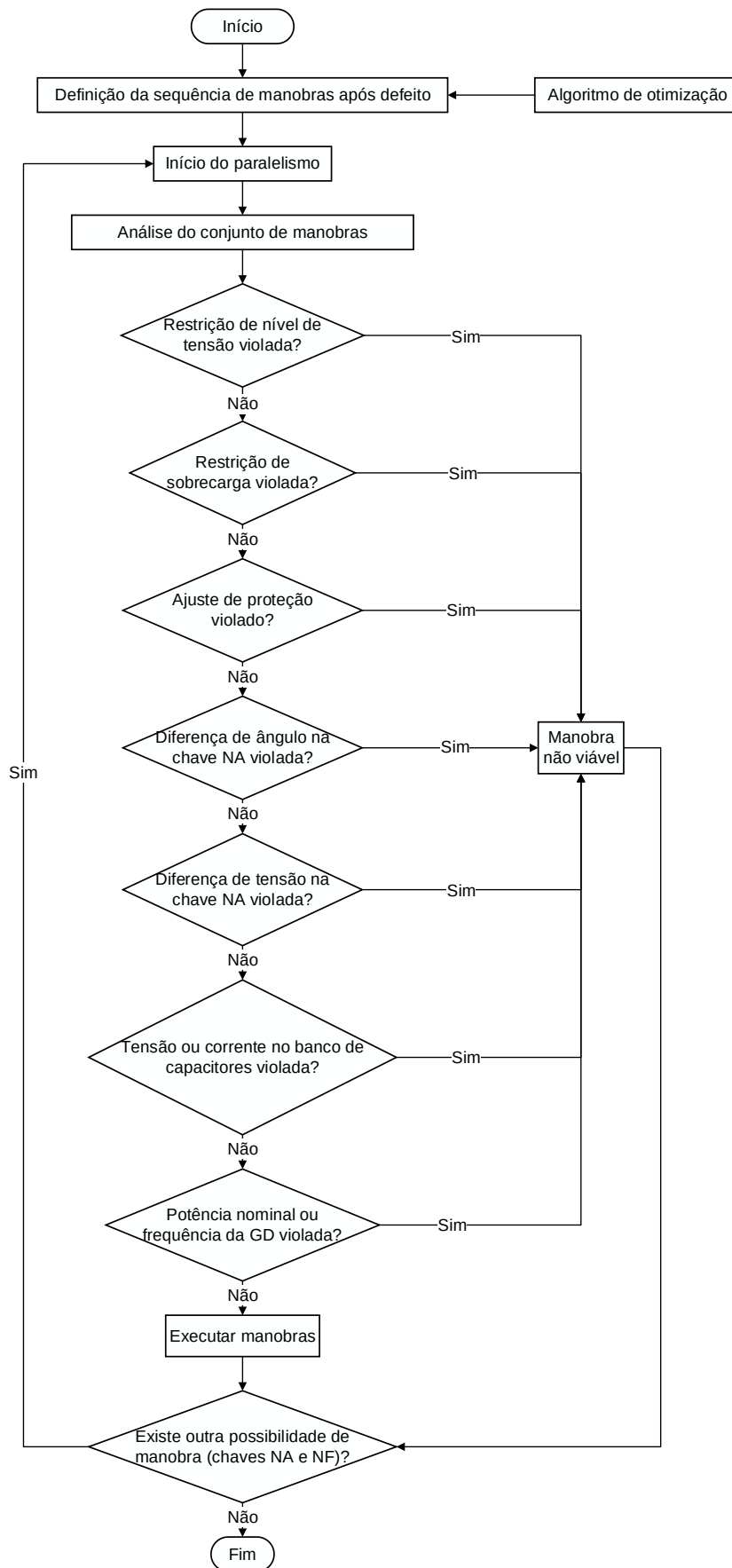
- **Frequência na geração distribuída**

Segundo o módulo 8 do PRODIST, a frequência das unidades geradoras em regime permanente deve ser estar entre 59,9 Hz e 60 Hz. Caso ocorram perturbações no SD, a frequência transitória tolerada é 59,5 Hz a 60,5 Hz durante 30 segundos possibilitando a recuperação do equilíbrio carga-geração.

3.2 VISÃO GERAL DA PROPOSTA

Visando avaliar a utilização da técnica de paralelismo de alimentadores para alterar a topologia da rede, maximizando a restauração do fornecimento de energia de consumidores em RDs em situação de contingência, este trabalho propõe uma metodologia geral para análise dos paralelismos em cascata em redes de distribuição, conforme apresenta a Figura 3.1. O algoritmo de otimização para definição da sequência de manobras não é o foco desta abordagem, e sim a análise da viabilidade técnica da realização dos paralelismos com a presença de geração distribuída.

Figura 3.1 – Fluxograma para análise de paralelismo em cascata em RDs.



Fonte: Próprio autor.

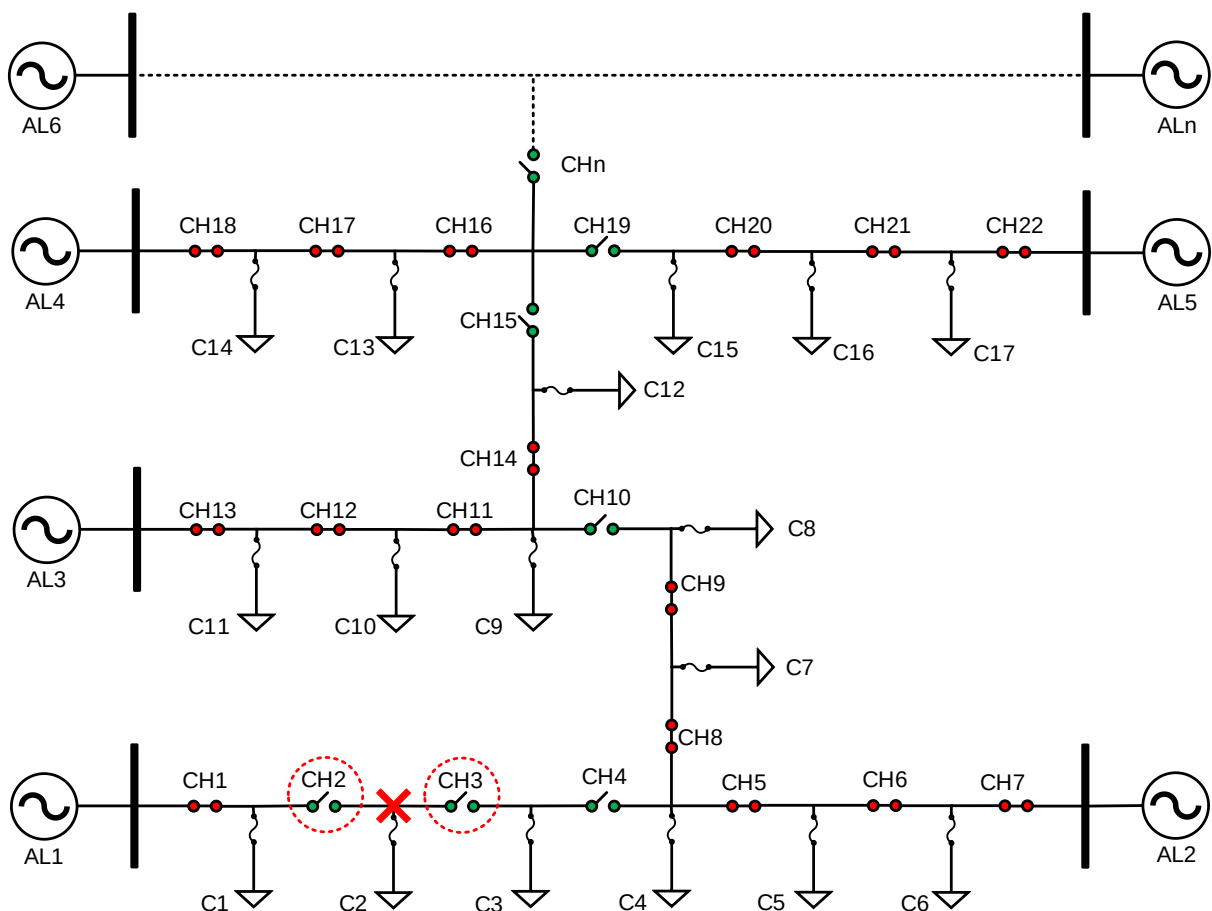
3.3 SEQUÊNCIA DE MANOBRAS PARA RESTABELECIMENTO DE ENERGIA

A proposta é integrar o método de análise dos paralelismos para transferência de carga em cascata à solução de *self-healing*. Então esse trabalho parte do pressuposto que a identificação dos equipamentos a serem manobrados já estarão definidos para os estudos.

A seguir, é apresentada a sequência de manobras proposta neste trabalho que leva em consideração a necessidade da utilização da técnica do paralelismo na reconfiguração automática da RD em situação de contingência. Desta forma observam-se os seguintes passos:

1º passo: identificar o local do defeito, e os equipamentos que atuaram para isolar a região afetada.

Figura 3.2 – Execução do 1º passo da sequência de manobras em uma RD.

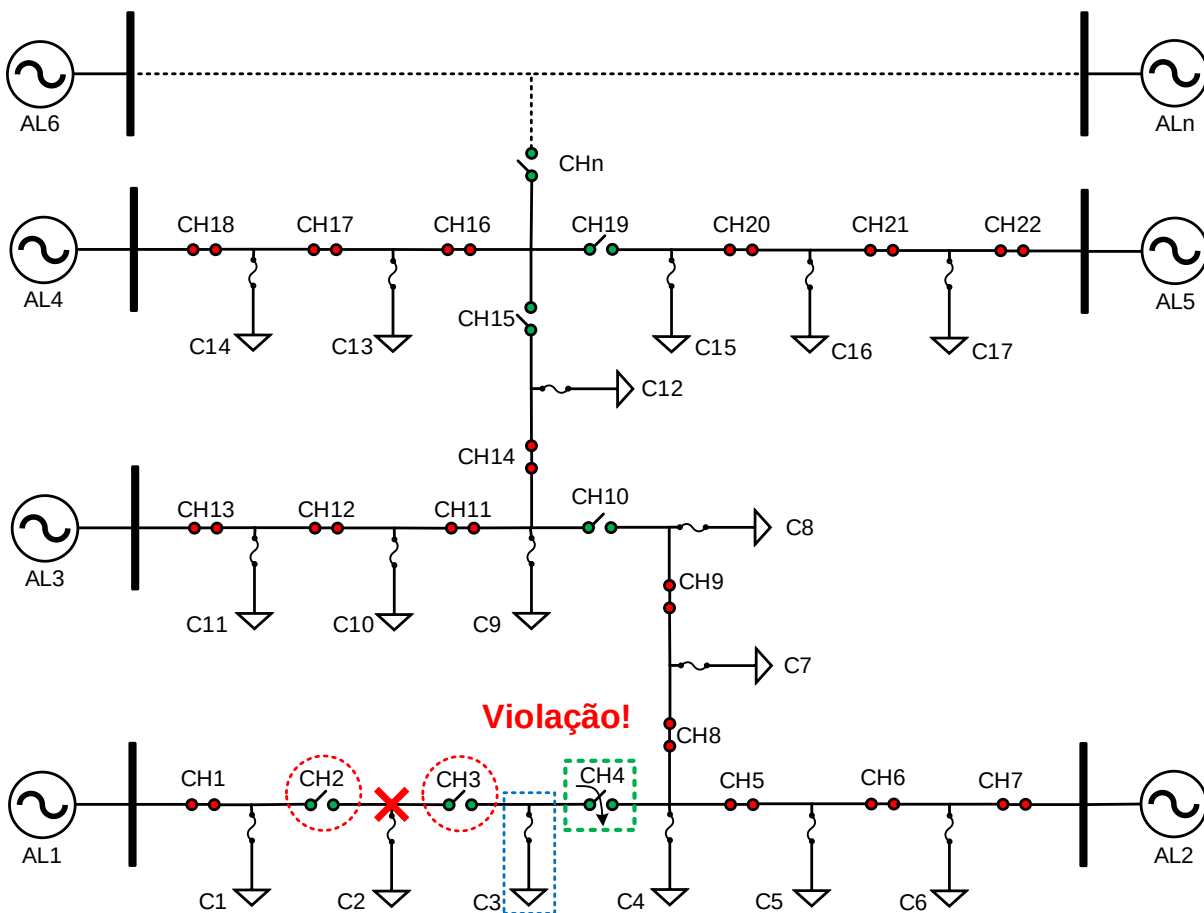


Fonte: Próprio autor.

A Figura 3.2 ilustra uma RD, na qual, inicialmente, as chaves 2 e 3 estavam fechadas. No entanto, em decorrência de um defeito ocorre a abertura destas chaves, o que coloca o SD em situação de contingência. Desta forma, executa-se o primeiro passo da estratégia para o restabelecimento de energia.

2º passo: verificar os consumidores afetados pela interrupção não programada que estão fora da zona defeituosa. Na sequência, verifica-se os equipamentos automatizados NA (chaves de interligação dos alimentadores) da rede para tentar conectar o maior número possível de consumidores ao alimentador adjacente mais próximo. Analisam-se as restrições técnicas. Se for viável, a manobra é realizada, e a análise finalizada. Se houver alguma violação, segue-se para o 3º passo.

Figura 3.3 – Execução do 2º passo da sequência de manobras em uma RD.



Fonte: Próprio autor.

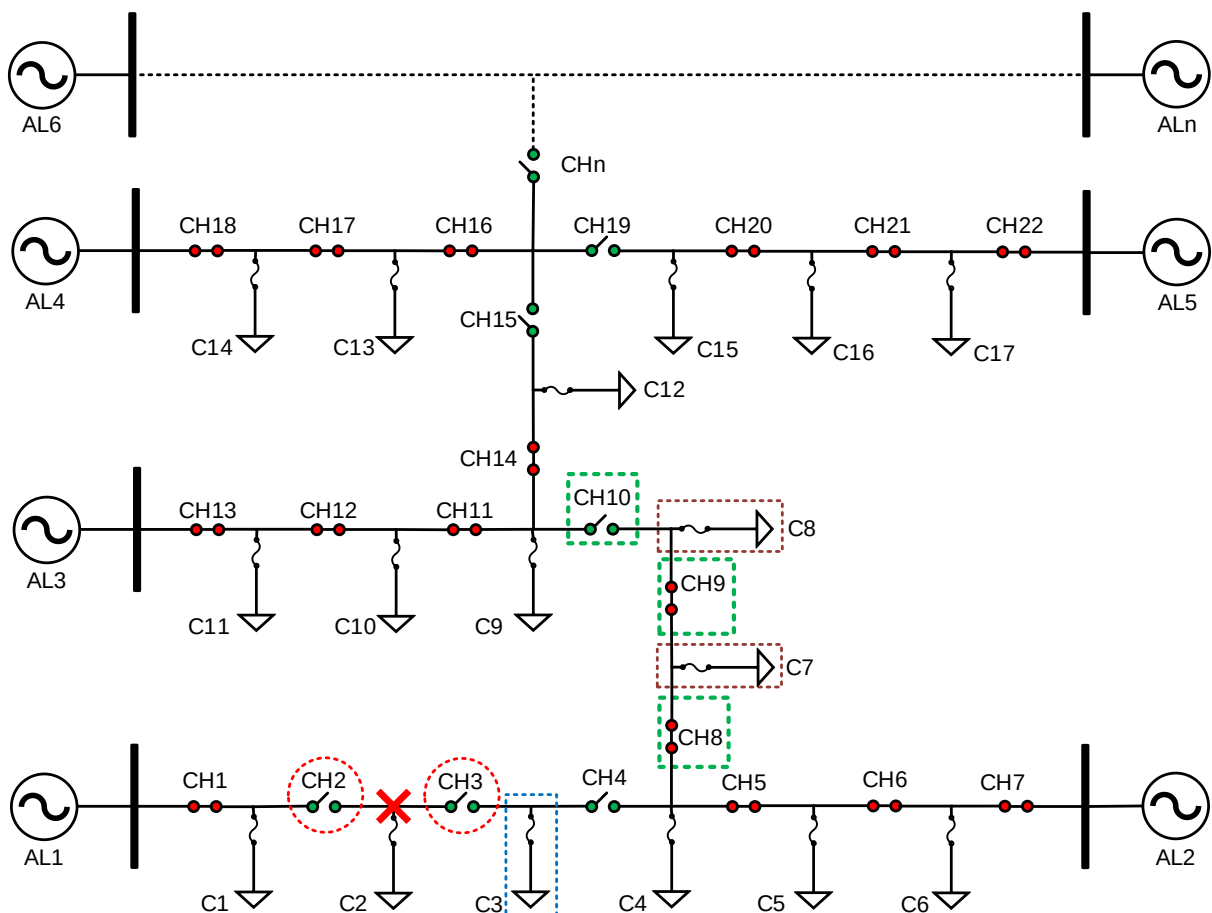
A Figura 3.3 ilustra o 2º passo do exemplo explicativo. O alimentador adjacente mais próximo é o AL2. A chave de interligação entre esses alimentadores é a CH4. Fechando esta chave seria possível restabelecer a energia do ramo C3 de

consumidores, que estão fora do trecho defeituoso. No entanto, ao se verificar este cenário, constata-se a violação de alguma das restrições técnicas. Por isso, no intuito de se aliviar parte da carga de AL2, segue-se para 3º passo, que marca o início do paralelismo. Com o fechamento momentâneo dos alimentadores em anel para as transferências de carga, deseja-se que não ocorra o desligamento de novos consumidores.

3º passo: (início do paralelismo). Verificar os equipamentos automatizados NA e NF a jusante do alimentador do 2º passo para tentar transferir parte de sua carga para outros alimentadores adjacentes menos carregados. Caso as restrições técnicas não sejam violadas, segue-se para o 4º passo. Caso contrário, para o 5º passo.

Seguindo a análise da RD do exemplo, neste momento o sistema identificaria as chaves 8 e 9 (ambas NF) e a CH10 (NA). Analisando a RD do exemplo, as cargas de AL2 que podem ser aliviadas para AL3 (próximo AL adjacente) são C7 e C8. A Figura 3.4 ilustra o 3º passo do método para o exemplo explicativo.

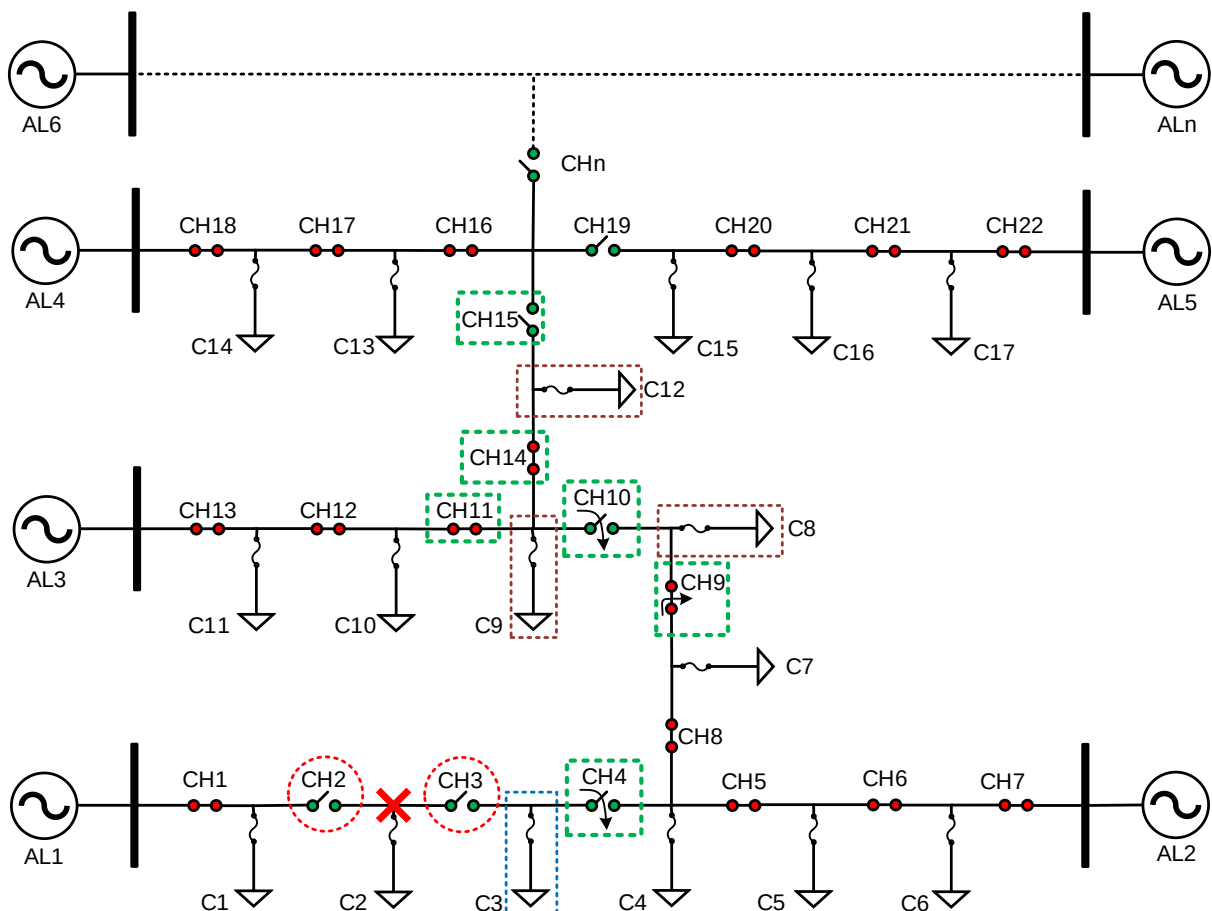
Figura 3.4 – Execução do 3º passo da sequência de manobras em uma RD.



5º passo: caso ocorra violação de carregamento deste outro alimentador, verifica-se outros dispositivos NA e NF adjacentes aos anteriores para transferência em cascata das cargas. Segue-se para o 6º passo. Em caso negativo, finaliza-se a análise, pois não haveria como aliviar os alimentadores anteriores. Este passo é importante, pois caso o alimentador que vai receber carga pelo paralelismo também viole as restrições, o próximo passo seria verificar se há a possibilidade de aliviar as suas cargas para um próximo alimentador da rede.

Para a RD do exemplo, considerando que ao tentar se transferir a carga C8 de AL2 para AL3, este último apresentasse alguma restrição, o próximo alimentador a ser colocado em paralelo seria AL4. As chaves manobradas poderiam ser CH14 (NF) e CH15 (NA) para transferir C12, ou CH11 (NF) e CH15 para transferir as cargas C9 e C12 de AL3 para AL4. Como já mencionado este trabalho visa apresentar a técnica dos paralelismos em cascata como estratégia associada ao *self-healing* e não em métodos de otimização para definir a melhor sequência de manobras.

Figura 3.6 – Execução do 5º passo da sequência de manobras em uma RD.



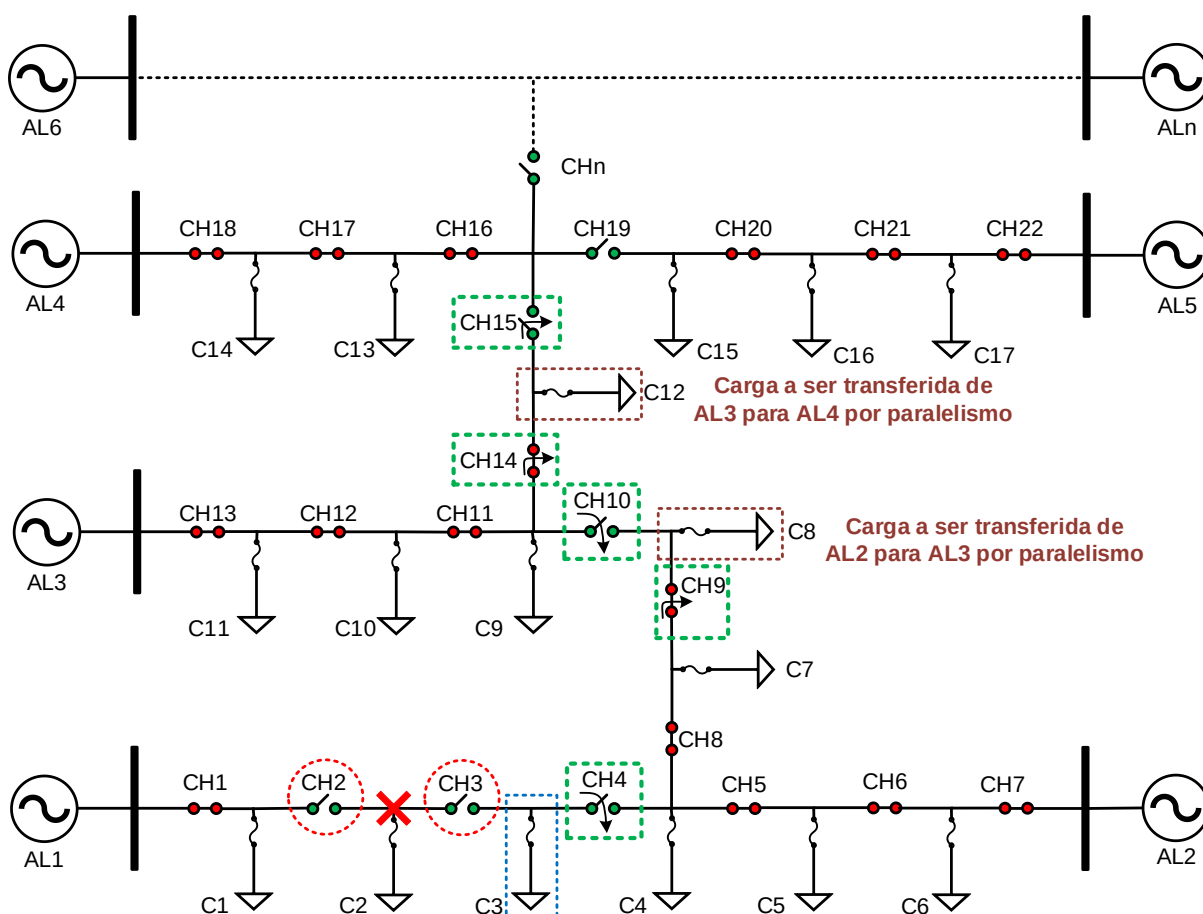
Fonte: Próprio autor.

6º passo: verificar as restrições técnicas. Caso as manobras sejam viáveis, segue-se para o 4º passo. Caso contrário, segue-se para o 5º passo.

Voltando ao exemplo, seria como considerar que o AL4 também violasse alguma restrição, e não pudesse receber parte cargas de AL3. Então, retornando ao 5º passo, o sistema procuraria um quinto alimentador adjacente a AL4, e assim sucessivamente. Desta forma, seriam feitas transferências das cargas para aliviar estes alimentadores até chegar em AL2 para restabelecer as cargas fora da zona de defeito. Caso não se encontrem mais equipamentos telecomandados e alimentadores (ALn) que viabilizassem as manobras, a análise é finalizada.

Ao retornar para o 4º passo, será considerado que a melhor topologia determinada para a RD em estudo segue a configuração apresentada na Figura 1.1Figura 3.7 para fins de exemplificação da sequência de manobras da metodologia proposta.

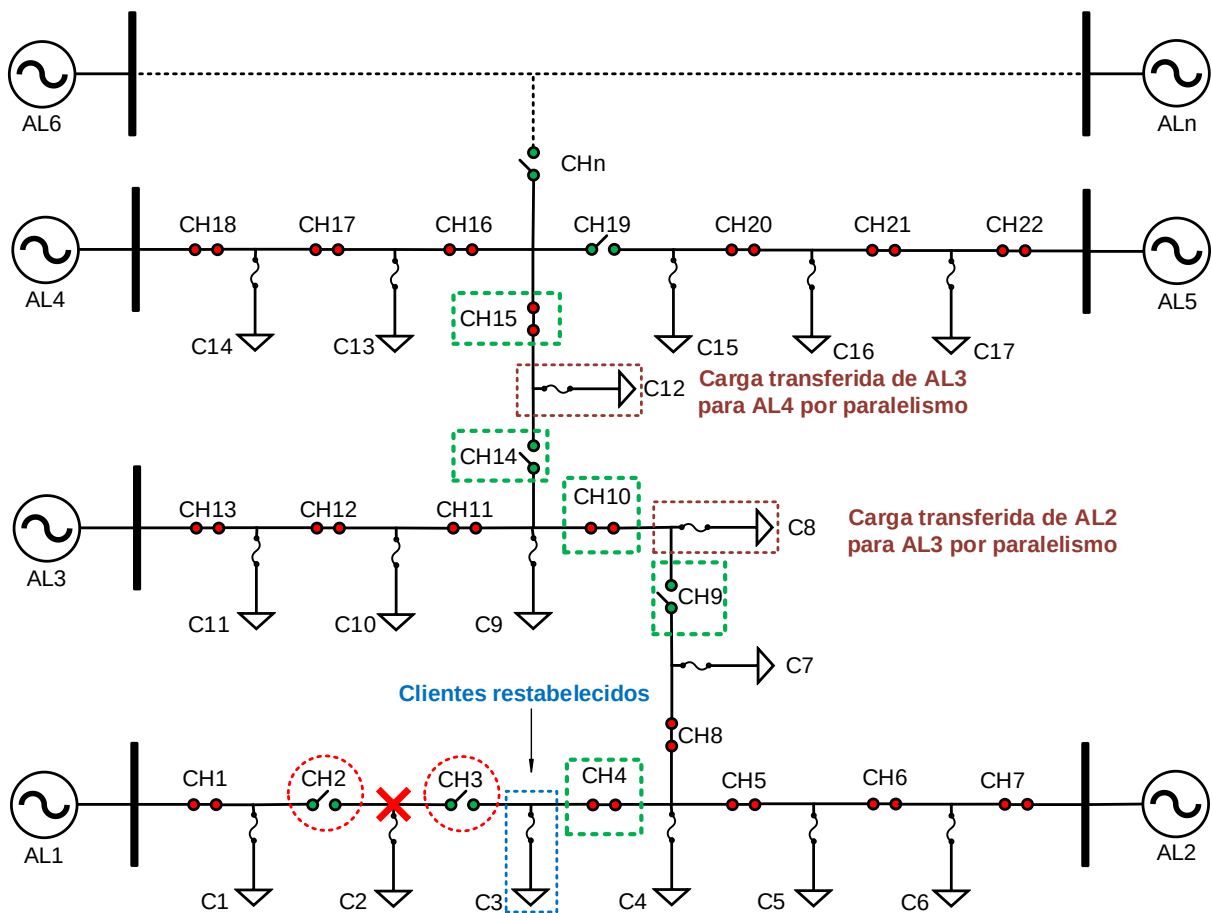
Figura 3.7 – Retorno do 6º ao 4º passo com definição das manobras de paralelismo em cascata.



7º passo: realizar o(s) paralelismo(s) com consecutivas transferências paralelas das cargas entre os alimentadores escolhidos, e ao final das manobras restabelecer o fornecimento de energia aos consumidores ligando-os ao alimentador do 3º passo que foi aliviado. Com isso, a análise é finalizada.

Neste momento, executam-se as manobras de paralelismos na RD, até se chegar no paralelismo de AL2 com AL3. Quando este último alimentador estiver com folga, as cargas da zona de defeito (C3) podem ser conectadas a ele. Como a técnica de *self-healing* pressupõe o restabelecimento automático, as chaves telecomandadas atuam diretamente no sistema de forma coordenada para realizar as transferências paralelas de carga.

Figura 3.8 – Execução das transferências de carga em cascata na RD do exemplo.



Fonte: Próprio autor.

Para a sequência de manobras apresentada, inicialmente o sistema executaria o paralelismo de AL4 e AL3 para transferir C12 para AL4. Ao final deste paralelismo, ligaria os alimentadores 2 e 3 em anel para transferir C8 para AL3. Ao final deste

paralelismo os consumidores representados por C3 serão restabelecidos sendo alimentados por AL2. A Figura 3.8 apresenta a execução destas manobras mostradas na Figura 3.7.

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO NO ATPDRAW

Nas simulações computacionais, modelar adequadamente o sistema elétrico em estudo é fundamental para garantir resultados confiáveis. Quanto maior a disponibilidade informações e confiabilidade dos dados, mais próximos da realidade se encontrarão os resultados simulados.

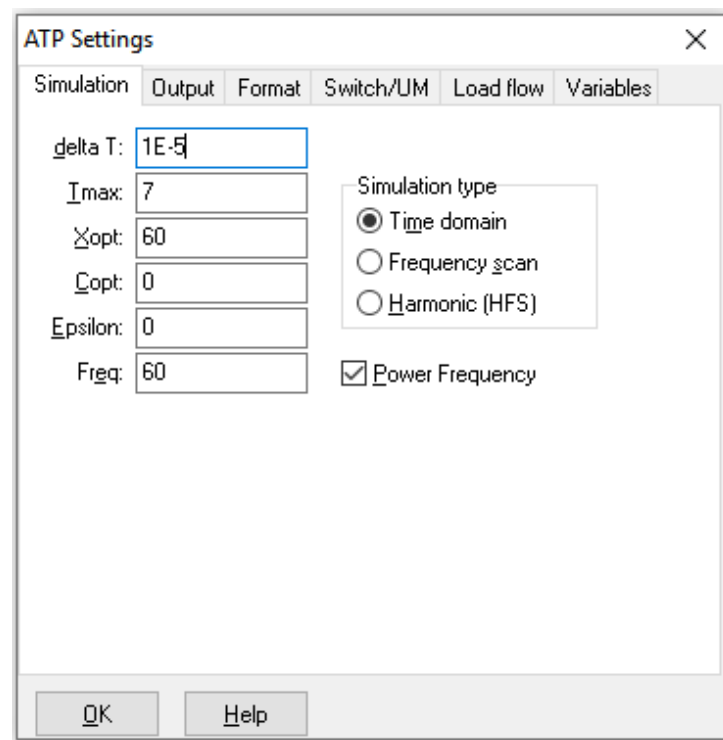
Durante as sucessivas transferências de carga, o sistema fica sujeito a elevações transitórias nos níveis de tensão e corrente, que podem ultrapassar os limites normais de operação. O software ATPDraw versão 6.3 foi escolhido para as análises deste trabalho, por ser um programa conhecido para a simulação de transitórios eletromagnéticos. A vantagem das simulações neste programa está na representação do sistema elétrico em uma mesma plataforma e nas análises em regime permanente e transitório, destacando-se dos demais softwares convencionais que não contemplam estes recursos.

O ATPDraw é uma versão mais sofisticada do programa ATP (*Alternative Transient Program*) e permite a modelagem adequada de circuitos elétricos através de elementos lineares e não lineares, para a simulação de transitórios eletromagnéticos em redes polifásicas, possibilitando a análise de diversas grandezas elétricas. Reproduz com exatidão a configuração elétrica real das redes, apresentando o diagrama unifilar em ambiente gráfico. Além disso, possui facilidades como o pré-processador gráfico e o PLOTXY (ATPDRAW, 2019).

As simulações deste trabalho são realizadas no domínio do tempo (*"Time domain"* no programa). Esta opção é selecionada na aba *"Simulation tipe"* do *"ATP Settings"*. Nesta aba o usuário também informa o passo temporal da simulação (*"delta T"*), o tempo máximo de simulação (*"Tmax"*), e selecionando *"Power Frequency"* a frequência do sistema (opção *"Freq"*). Recomenda-se um passo de simulação pequeno, para garantir mais detalhes nos resultados das formas de onda analisadas. O tempo total da simulação deve ser suficiente para o usuário observar as grandezas elétricas em estudo nos regimes permanente e transitório de maneira satisfatória. Desta forma, diminui-se o consumo de armazenamento e processamento de dados, o

que torna a simulação mais rápida. Os parâmetros “*Xopt*” e “*Copt*” representam a frequência que será usada para o cálculo das reatâncias dos elementos indutivos e capacitivos do sistema. Ao informar estas frequências, o usuário não precisa realizar as conversões. A Figura 3.9 já apresenta a configuração do ATPDraw para a simulação do estudo de caso proposto neste trabalho.

Figura 3.9 – Configuração do ATPDraw para o estudo de caso.



Fonte: Próprio autor.

Para a resolução numérica do sistema de equações diferenciais em simulações no domínio do tempo, o ATPDraw emprega o método de integração trapezoidal (ATP-EMTP, 2019). A seguir, são descritas as técnicas utilizadas para a modelagem dos componentes elétricos dos SDs no programa ATPDraw.

- **Fontes de tensão**

As fontes do ATPDraw são representadas por geradores trifásicos, com tensões cossenoidais equilibradas nos seus terminais, ou seja, os valores máximos da tensão são iguais e defasados de 120° entre si. As versões mais novas do programa apresentam o componente “ACSOURCE”, onde o usuário escolhe o tipo de fonte (corrente ou tensão), o número de fases (monofásica ou trifásica), a unidade do

ângulo (graus ou segundos) e se a fonte é aterrada ou não. A amplitude da fonte pode ser informada em valores de pico, eficaz de fase ou eficaz de linha.

Após escolher a fonte apropriada para o estudo desejado, o usuário deve informar os parâmetros numéricos da simulação, sendo eles: amplitude, frequência, defasagem angular ("*PhaseAngle*"), tempo de início ("*StartA*") e fim ("*StopA*") da operação da fonte na simulação.

Com "*StartA*" com valor "-1" o usuário indica ao programa que as fontes já estão em regime permanente, fornecendo tensão ao sistema. O ATP equaciona a forma de onda da tensão através de uma função cosseno. Por isso, caso seja de interesse do usuário, esta função pode ser atrasada em 90° (*PhaseAngle* = -90 graus) e, portanto, os cálculos são feitos considerando a tensão ou a corrente como uma função senoidal.

- **Equipamentos de manobra**

Os equipamentos de manobra necessários para a reconfiguração da RD durante o paralelismo são as chaves telecomandadas e sincronizadas para operarem em tempos pré-ajustados. O componente "SWIT_3XT" é utilizado para representar as chaves da RD, sendo necessário indicar o tempo de fechamento ("*T-cl*") e abertura ("*T-op*") de cada uma das fases do equipamento.

Na simulação, caso o valor de "*I_{mar}*" seja maior que zero, a chave abrirá somente se o módulo de sua corrente for menor que "*I_{mar}*". Para o estudo de caso proposto, é atribuído o valor zero a este parâmetro, pois o tempo de comutação das chaves deve ser respeitado. Na aba "*Output*" o usuário pode escolher fazer medição de corrente, tensão, potência ou energia associada a este elemento.

- **Redes elétricas**

Segundo Zanetta Jr. (2005, p. 141), "em linhas com comprimentos inferiores a 80 km, a 60 Hz, é razoável desprezar as capacitâncias (admitâncias) para a terra, ficando o modelo apenas com uma impedância em série". A equação (3.5) apresenta a impedância das linhas.

$$Z_L = R_L \cdot L + j \cdot X_L \cdot L \quad (3.5)$$

Onde Z_L é a impedância do trecho de rede por fase (Ω); R_L é a resistência unitária por fase (Ω /km); L é o comprimento do trecho de rede (km); e X_L é a reatância indutiva unitária por fase (Ω /km).

Na modelagem no ATPDraw, o usuário deve informar a impedância do condutor utilizado e o comprimento de cada trecho da rede. O componente “LINESY_3” foi utilizado para modelar as redes elétricas. Em sua janela de configuração, foram informados os valores de R_o , resistência de sequência zero; R_+ , resistência de sequência positiva; L_o , indutância ou reatância (se “ X_{opt} .” = frequência do sistema) de sequência zero; e L_+ , indutância/reatância de sequência positiva. Esses valores de resistência e reatância dos condutores da RD em estudo estão listados no Anexo A deste trabalho.

• Cargas elétricas

Em RDs de média tensão, é usual representar os consumidores primários e os transformadores de distribuição como cargas concentradas (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005, p.161). Entre os modelos de representação do comportamento da carga em função da tensão aplicada, destacam-se: as cargas de impedância constante com a tensão (Z), cargas de corrente constante com a tensão (I), cargas de potência constante com a tensão (P), e cargas constituídas pela combinação dos modelos anteriores (modelo ZIP) (KAGAN; OLIVEIRA; ROBBA, 2005, p.162). Neste trabalho, as cargas são consideradas como impedância constante, e sua impedância (Z_C) foi determinada utilizando a equação (3.6).

$$Z_C = \frac{\left(\frac{V_n}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{(P_C + j \cdot Q_C)^*}{3}} = R_C + j \cdot X_C \quad (3.6)$$

Onde V_n é a tensão nominal de linha da rede, P_C é a potência ativa da carga, Q_C é a potência reativa da carga, e R_C e X_C representam os valores de resistência e reatância da carga a serem informados pelo usuário no ATPDraw para simulação. O fator $1/\sqrt{3}$ refere-se a conversão da tensão de linha para tensão de fase, e $1/3$ corresponde a conversão da potência trifásica em potência monofásica.

O componente “RLCY3” representa as cargas da RD modelada no ATPDraw neste trabalho. Para isso, o usuário deve informar os valores de resistência e reatância em cada fase. A aba “*Output*” permite que sejam feitas medições de corrente, tensão, potência ou energia associadas a este elemento.

Utilizando o mesmo componente do ATPDraw (“RLCY3”), foram modelados os bancos de capacitores da rede em estudo. A capacitância do banco (C_{BC}), que está em derivação na rede, é determinada pela equação (3.7)

$$C_{BC} = \frac{Q_{BC}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_n^2} \quad (3.7)$$

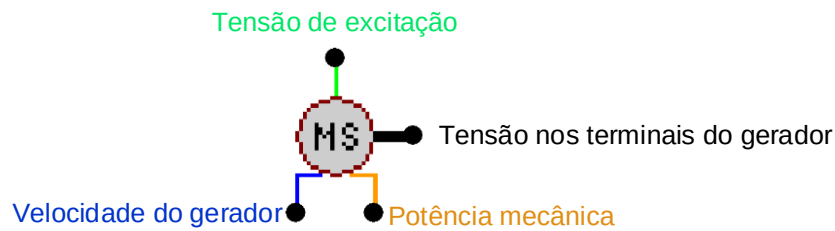
Onde Q_{BC} é a potência reativa do banco de capacitores, f é a frequência da rede, V_n a tensão nominal de linha do banco.

• Geração Distribuída

O gerador síncrono distribuído modelado neste trabalho, foi retirado da tese de (MOURA, 2011), que utilizando a função “*Data Base Modularization*” (DBM) do programa realizou a representação de uma máquina síncrona. Essa função permite a criação de outras bibliotecas modelo, cujo objetivo é atender os parâmetros de projetos conforme as necessidades do usuário em função da aplicação modelada. Por meio desta função é possível agrupar um ou mais componentes do programa em um novo módulo, que se torna um novo modelo dentro das simulações no ATP. Para isso, esses módulos são armazenados em arquivos ***.lib**, que permitem sua inclusão em quaisquer simulações no programa. Mais informações sobre o DBM podem ser obtidas no fórum do (ATPDRAW, 2019).

O algoritmo de implementação da máquina através da função DBM é apresentado no Anexo B. Os parâmetros da máquina síncrona foram obtidos por (MOURA, 2011) com a fabricante WEG e são apresentados no Anexo C deste trabalho. A Figura 3.10 apresenta o bloco da máquina síncrona no ATPDraw com seus terminais para tensão de excitação (E_f), velocidade do gerador (ω), tensão trifásica terminal (V_t) e potência mecânica (P_m).

Figura 3.10 – Representação do gerador síncrono distribuído no ATPDraw.

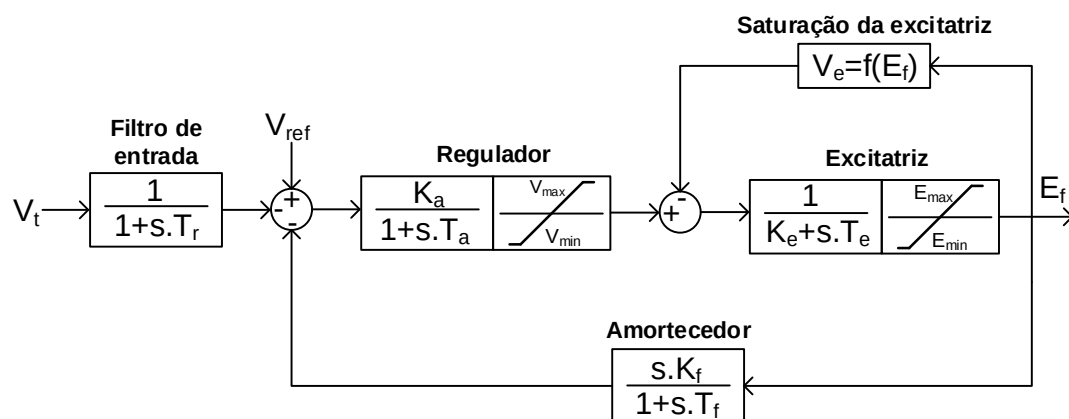


Fonte: Próprio autor.

Em seguida, foi modelado o regulador de tensão (*Automatic Voltage Regulator* – AVR) da GD que tem a função de aumentar a estabilidade da máquina sob carga, diminuir a instabilidade transitória e prevenir sobretensões após a rejeição de carga. Estes reguladores controlam a saída da excitatriz da máquina, modificando a corrente fornecida por ela quando necessário. De forma sucinta, segundo (MADRUGA, 2018), a função do regulador é monitorar a tensão terminal do gerador e compará-la com um valor de referência. A diferença dessa comparação é enviada para a excitatriz, que fornecerá então a corrente necessária para o controle da tensão terminal.

A Figura 3.11 apresenta o regulador de tensão modelado neste trabalho, que é o tipo I do IEEE também retirado de (MOURA, 2011).

Figura 3.11 – Modelo do regulador de tensão do tipo I do IEEE.



Fonte: Adaptado de (MOURA, 2011, p. 66).

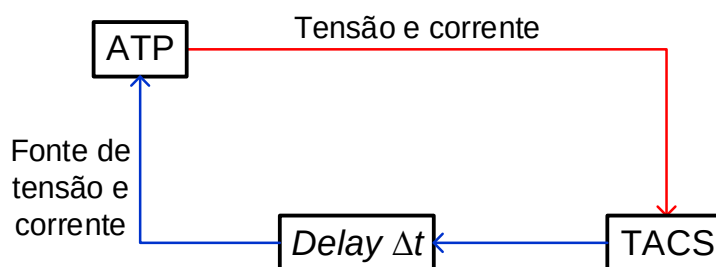
Analisando a Figura 3.11, que apresenta a malha de controle deste regulador de tensão, verifica-se que a tensão dos terminais da máquina (V_t) após passar pelo

filtro de entrada, que utiliza uma constante de tempo T_r (normalmente de valor bem pequeno) é comparada com a tensão de referência (V_{ref}). O sinal com erro resultante desta comparação passa pela função de transferência do regulador com ganho K_a e constante de tempo T_a , além de seus limites de excitação máximo (V_{max}) e mínimo (V_{min}), que representam os limites de sobre-excitação e subexcitação para que a máquina não sofra danos físicos ou perda de estabilidade. Este sinal é então somando ao efeito de saturação da excitatriz (V_e), passando em seguida pela função de transferência da excitatriz com ganho K_e e constante de tempo T_e , respeitando os limites máximo (E_{max}) e mínimo (E_{min}). O sinal obtido na saída deste bloco é a tensão de excitação (E_f), que é aplicada no enrolamento de campo do gerador síncrono. O sinal estabilizante (ou de amortecimento), E_f , é inserido por realimentação no somador da entrada do AVR passando por uma função de transferência com ganho K_f e constante de tempo T_f .

Para implementação do AVR no ATPDraw, que não dispõe deste regulador em sua biblioteca padrão de componentes, o diagrama de blocos da malha de controle foi implementado dentro do módulo utilizando a rotina TACS (*Transient Analysis of Control Systems*). Os TACS são uma ferramenta do programa que permitem modelar diferentes técnicas de controle em uma simulação, representando funções de transferência, somadores, limitadores estáticos e dinâmicos, chaves controladas, detectores de sinais, e demais funções que podem definidas pelo usuário.

Convém ainda ressaltar que em uma simulação o circuito elétrico modelado e os componentes desenvolvidos em TACS funcionam separadamente, conforme ilustra a Figura 3.12.

Figura 3.12 – Atraso de tempo nas rotinas criadas em TACS no ATPDraw.

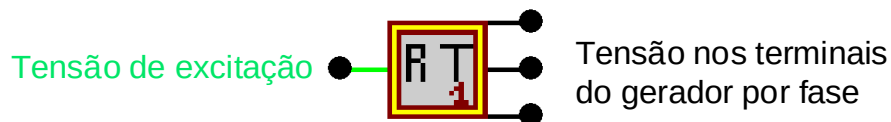


Fonte: Adaptado de (MOURA, 2011, p. 69).

Na Figura 3.12, observa-se que em um instante t da simulação as grandezas do sistema elétrico (tensão ou corrente) são repassadas para as TACS, que conforme sua configuração processam esses dados e os devolvem ao sistema elétrico por meio de fontes de tensão ou de corrente no instante $t - \Delta t$. Desta forma, o programa analisa o sistema elétrico, processa as TACS, e entrega a resposta com um retardo de tempo de um passo de integração. Para mais informações sobre TACS a página (ATP-EMTP, 2019) e o fórum do (ATPDRAW, 2019) podem ser consultados.

Para implementação da malha de controle dos reguladores da máquina síncrona no ATPDraw, é necessário projetar cada um dos blocos do sistema de controle nas TACS em sua ordem natural de execução. Em seguida, o módulo criado é representado no programa através da função DBM. O algoritmo de implementação deste regulador é apresentado no Anexo B do trabalho. A Figura 3.13 apresenta o bloco do regulador de tensão com seus terminais para tensão de excitação (E_f) e tensão nas fases dos terminais da máquina.

Figura 3.13 – Representação do regulador de tensão tipo I do IEEE no ATPDraw.

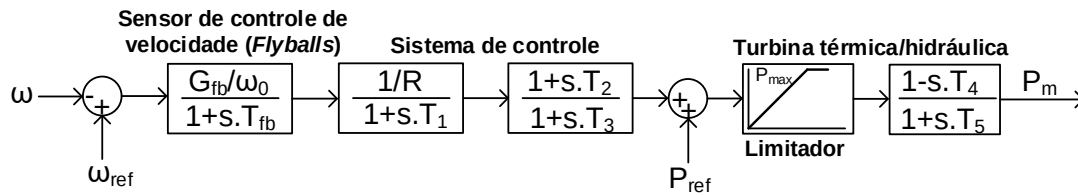


Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros do regulador de tensão são apresentados no Anexo C deste trabalho.

Os reguladores de automáticos de velocidade (*Speed Governor – GOV*) das máquinas síncronas visam controlar e ajustar sua velocidade por meio de modificações no suprimento de potência mecânica no eixo da máquina primária quando necessário. Em suma, a função deste regulador é acompanhar as variações de velocidade da máquina e compará-las com um valor de referência, de modo a aumentar ou reduzir a potência do grupo de geração quando o valor da comparação não for condizente. O diagrama de blocos do regulador de velocidade associado ao gerador síncrono deste trabalho é apresentado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Modelo do regulador de velocidade do gerador síncrono.

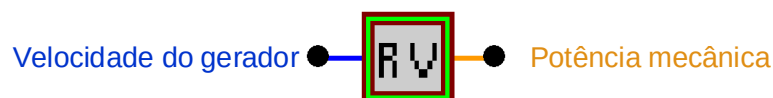


Fonte: Adaptado de (MOURA, 2011, p. 88).

Da Figura 3.14, observa-se que o sinal de velocidade da máquina (ω) é comparado com a velocidade de referência (ω_{ref}). O sinal proveniente (erro) passa pela função de transferência do *flyball*, com ganho G_{fb} e constante de tempo T_{fb} . Em seguida, este sinal passa pelo sistema de controle com regulação ou “estatismo temporário” (R) e constantes de tempo T_1 , T_2 e T_3 . O sinal obtido é então somado a potência de referência (P_{ref}), e o resultado é aplicado na função de transferência da turbina térmica/hidráulica com constantes de tempo T_4 e T_5 , e pelo limite de potência mecânica máxima da turbina (P_{max}). Finalmente, o sinal de controle é aplicado no eixo do gerador, para aumentar ou diminuir a potência do grupo de geração, caso sua velocidade se afaste do valor de referência. Nos geradores síncronos conectados a turbinas a vapor T_4 é igual a zero.

A implementação do regulador de velocidade se deu de forma análoga ao regulador de tensão, ou seja, realizou-se a modelagem das funções de transferência deste regulador nas TACS do programa, e se desenvolveu o novo modelo para o ATPDraw utilizando a DBM, conforme apresenta a Figura 3.15 com a indicação da velocidade do gerador (ω) e sua potência mecânica (P_m).

Figura 3.15 – Representação do regulador de velocidade no ATPDraw.



Fonte: Próprio autor.

O algoritmo de implementação do regulador de velocidade da máquina é apresentado no Anexo B e seus parâmetros do bloco de controle no Anexo C.

- **Transformador**

Para conectar a GD à RD é necessário modelar um transformador que eleve a tensão da geração da máquina síncrona para os níveis de tensão da RD. Foi escolhido o componente “SATTRAFO” da biblioteca do ATPDraw para modelar o transformador. Para sua modelagem o usuário deve cadastrar os seguintes dados: resistência de magnetização e corrente que circula o ramo magnetizante; fluxo no ramo de magnetização em regime permanente; resistência, indutância e tensão no enrolamento primário; tipo de acoplamento (Y- Δ , Δ - Δ , etc.); e resistência, indutância e tensão no enrolamento secundário. Além disso, é possível parametrizar a curva de saturação do transformador, tornando a simulação deste equipamento mais realística.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou a metodologia proposta neste trabalho, que se baseia na utilização da técnica de paralelismo em situações de contingência para agilizar o processo de restauração do fornecimento de energia em RDs dotadas da capacidade de *self-healing*. O objetivo é minimizar a área afetada pelo defeito e restaurar o serviço ao maior número de consumidores no menor tempo possível. A metodologia apresentada considera ainda os alimentadores com alto carregamento, de forma que as transferências paralelas de cargas são necessárias, antes da restauração da energia aos consumidores através de sua conexão ao alimentador adjacente mais próximo.

Durante a ligação paralela dos alimentadores (fechamento em anel) podem surgir transitórios eletromagnéticos significativos de corrente e/ou tensão capazes de desencadear novas perturbações ainda mais abrangentes na operação da rede do que o defeito inicial. Por isso, o capítulo apresentou as restrições técnicas que devem ser observadas antes da execução dos paralelismos, bem como a sequência de manobras para a reconfiguração automática da rede.

Finalmente, o capítulo apresentou a modelagem dos componentes das RDs no ATPDraw, que é o programa onde os estudos propostos são analisados. No contexto da operação de SD, os estudos de paralelismo para reconfiguração automática das redes em situação de contingência exigem a utilização de ferramentas computacionais confiáveis, eficientes e de execução rápida para análise das manobras.

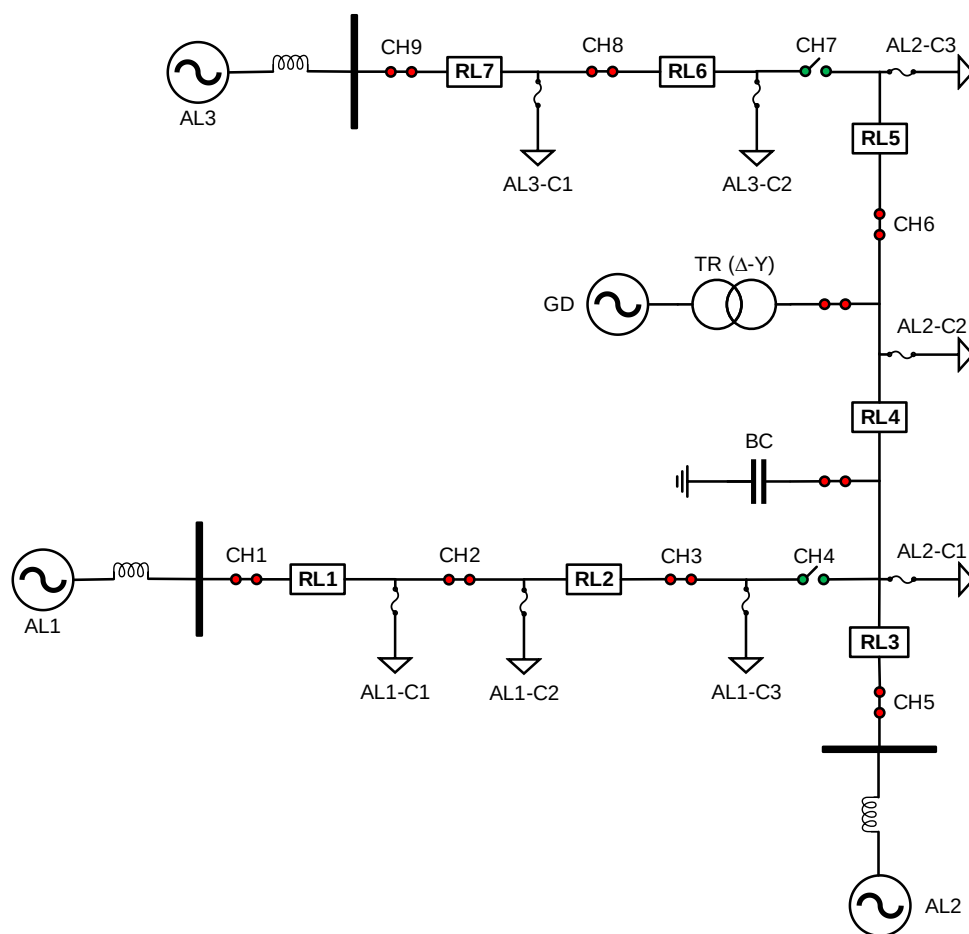
4 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação da metodologia detalhada no Capítulo 3. A análise das restrições técnicas, a partir das simulações no ATPDraw, visa verificar a viabilidade das transferências paralelas de carga por meio do paralelismo de alimentadores em uma RD em situação de contingência no contexto de *self-healing*.

4.1 REDE DE DISTRIBUIÇÃO EM ESTUDO

A Figura 4.1 apresenta o diagrama unifilar da RD, na qual a metodologia de restauração de energia por meio do paralelismo proposta neste trabalho será testada.

Figura 4.1 – Rede de distribuição em estudo.



Esta rede possui três alimentadores representados por fontes de tensão ideal (barramento infinito) de 13,8 kV em série com uma reatância relativa ao nível de curto-circuito de $0,65 \, \Omega$. Todas as chaves (CH) normalmente fechadas (NF) e as chaves normalmente abertas (NA) da rede são telecomandadas. As cargas são simbolizadas por triângulos e estão conectadas em Y. Seus valores de potência ativa (P_C) e reativa (Q_C) são, respectivamente, 1,15 MW e 450 kVAr. A Tabela 4.1 apresenta o tipo de condutor e comprimento (L) para cada linha representada pelo bloco RL na rede. Os valores unitários de resistência e reatância dos condutores usualmente utilizados em RDs são apresentados no Anexo A deste trabalho.

Tabela 4.1 – Parâmetros das linhas de distribuição.

Descrição	Tipo de condutor	Classe de tensão (kV)	L (km)
RL1	3#4/0CA	13,8	3
RL2	3#4/0CA	13,8	1
RL3	3#1/0CA	13,8	3
RL4	3#1/0CA	13,8	1
RL5	3#1/0CA	13,8	1
RL6	3#4/0CA	13,8	2
RL7	3#4/0CA	13,8	3

Fonte: Próprio autor.

O gerador síncrono distribuído (cuja máquina primária são turbinas a vapor) está conectado a RD por meio do transformador TR. A potência aparente nominal deste transformador é 5 MVA, sua reatância é 5% e sua tensão nominal de operação é 6,6/13,8 kV. A rede possui ainda um banco de capacitores cuja potência reativa nominal é 3,6 MVar, conectado em Y na tensão de 13,8 kV.

As informações necessárias para modelagem do gerador síncrono, bem como seus reguladores de tensão e velocidade foram retirados de (MOURA, 2011) e são apresentados no Anexo C deste trabalho. Segundo este autor, estes dados foram obtidos diretamente com a fabricante da máquina que é a WEG.

Como estudo de caso, serão consideradas as análises realizadas para atender às solicitações de transferências paralelas das cargas, em função de uma situação de contingência. O objetivo principal é restabelecer a energia para os consumidores

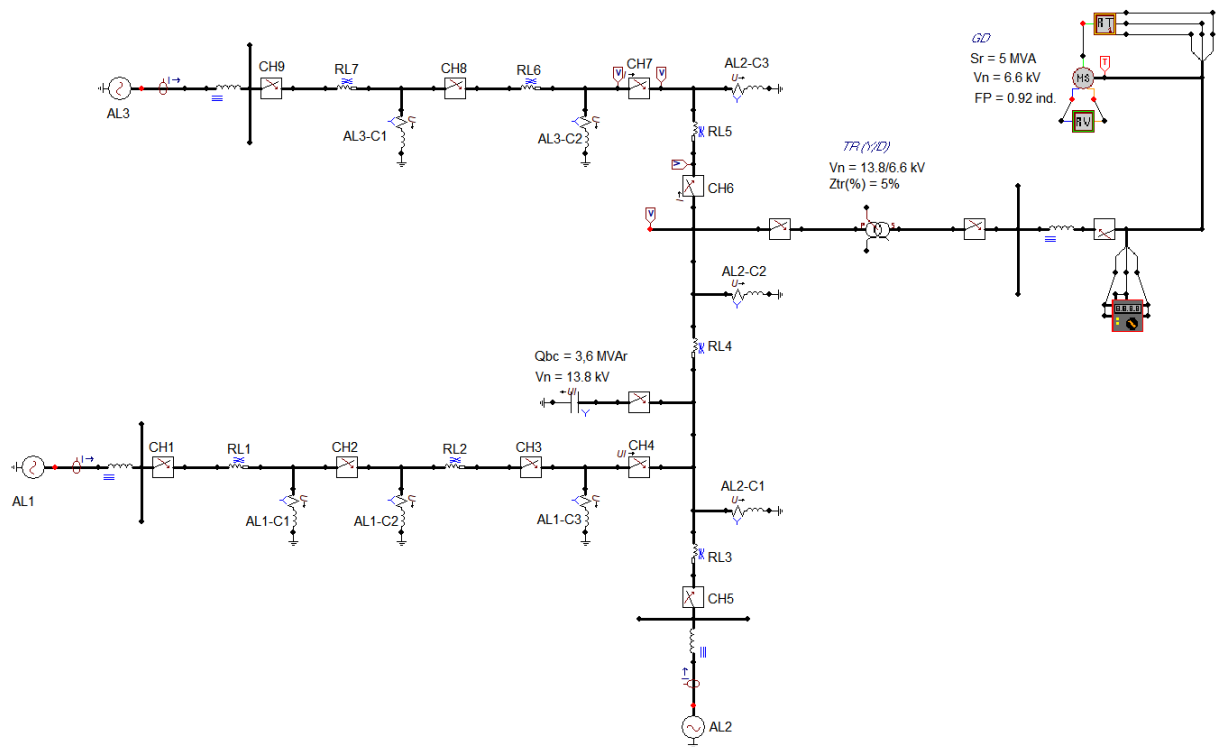
através das transferências de carga em paralelo entre os alimentadores, por meio do fechamento e abertura das chaves telecomandadas da RD, sem ocasionar mais nenhuma interrupção mesmo que de curta duração entre os demais consumidores. Para isto, é necessário verificar a viabilidade técnica das manobras, que serão realizadas em anel, resultando no paralelismo de alimentadores.

O desenvolvimento desta metodologia é extremamente importante para as redes inteligentes dotadas da capacidade de *self-healing*, cuja principal característica é a capacidade de auto restabelecer a energia de maneira rápida, eficaz e automática. Vale ressaltar que a ANEEL, no módulo 8 do PRODIST, não contabiliza como penalidade para concessionária interrupções inferiores a três minutos (ANEEL, 2019).

4.2 DESCRIÇÃO DA SIMULAÇÃO

Após a correta modelagem de todos os elementos, a RD em estudo simulada no ATPDraw é mostrada na Figura 4.2.

Figura 4.2 – Modelo da rede no ATPDraw.

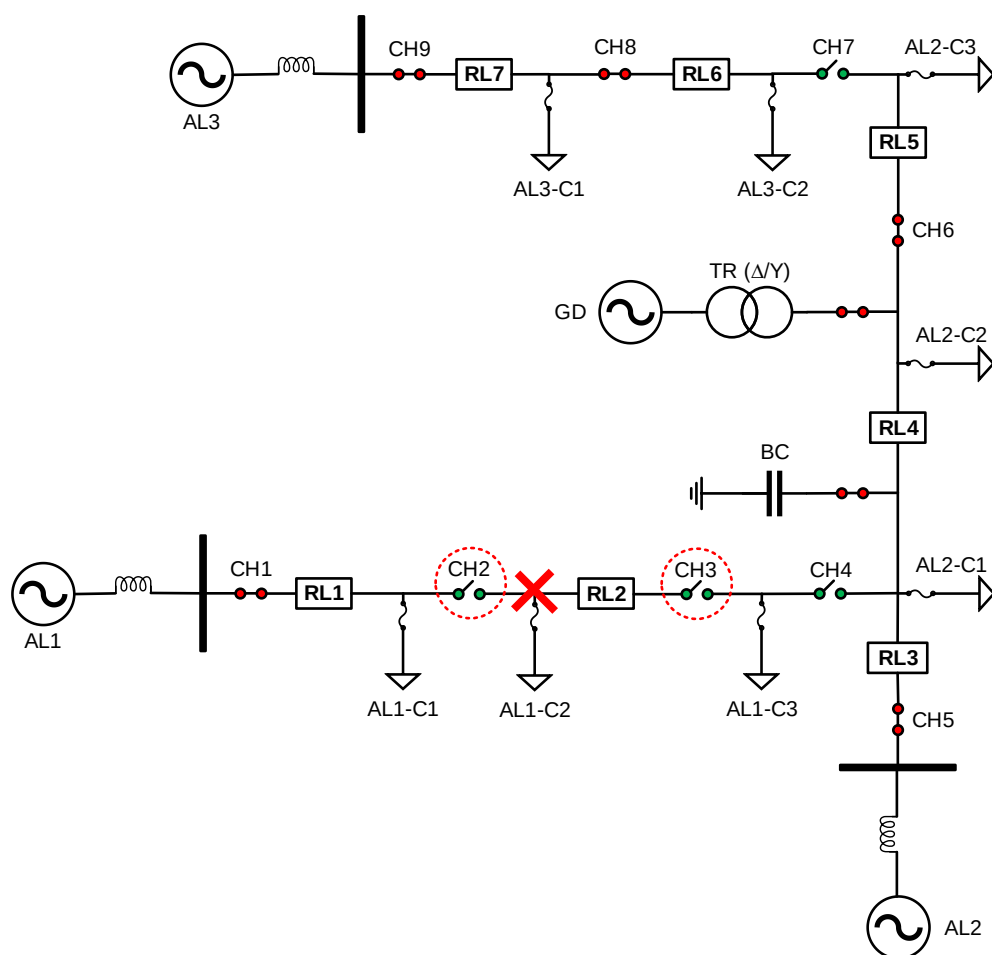


Fonte: Próprio autor.

Na Figura 4.2 é possível observar que, inicialmente, a carga representada por AL1-C1 está originalmente ligada ao AL1 através da chave CH1 (NF), bem como as cargas representadas por AL1-C2 e AL1-C3, através das chaves CH2 (NF) e CH3 (NF). As cargas AL2-C1, AL2-C2 e AL2-C3 estão ligadas ao alimentador representado pela fonte AL2. A fonte AL3 alimenta as cargas representadas por AL3-C1 e AL3-C2.

Uma falta permanente na rede do alimentador AL1, localizada no trecho compreendido entre CH2 e CH3, provoca o desligamento dos consumidores representados pelos componentes AL1-C2 e AL1-C3, através da abertura destas chaves, conforme ilustra a Figura 4.3.

Figura 4.3 – Representação do local do defeito na RD.

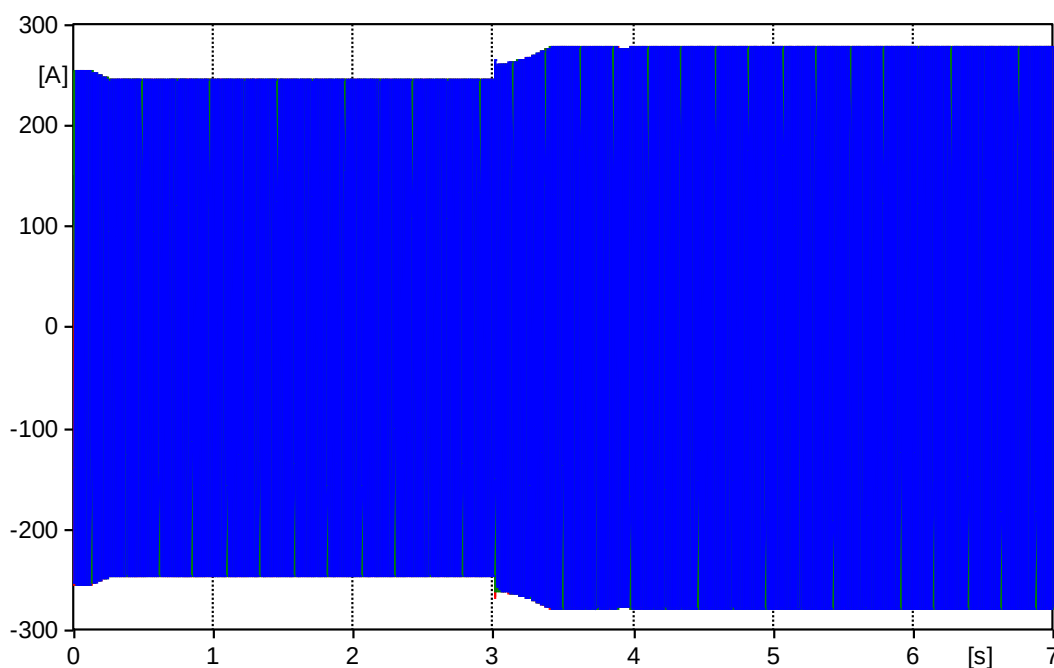


Fonte: Próprio autor.

Desta forma, a proposta é restabelecer a energia elétrica dos consumidores representados pela carga AL1-C3, minimizando a área defeituosa e garantindo o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores da rede, frente à falta permanente detectada.

Analizando a Figura 4.3, uma possível solução que poderia ser cogitada para este problema, desconsiderando as transferências de carga em paralelo, seria fechar a CH4 (NA) e conectar a carga em questão ao alimentador da fonte AL2. No entanto, esta opção é inviável tecnicamente, considerando o carregamento deste alimentador. A Figura 4.4 mostra que para esta configuração ocorre a violação dos limites de carregamento do AL2 da rede.

Figura 4.4 – Violação do limite de carregamento desconsiderando a transferência em paralelo para restauração da energia elétrica.



Fonte: Próprio autor.

Nesta simulação, o valor eficaz de corrente verificado com o programa ATPDraw foi de 197,22 A. Porém, a capacidade admissível do condutor 3#1/0CA é de 203 A, e o ajuste do relé de sobrecorrente está em 90%, ou seja, a máxima corrente admissível é 182,7 A. Logo, a manobra é considerada inviável tecnicamente.

4.3 ANÁLISE DOS TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

Assim, a proposta será inicialmente transferir a carga representada por AL2-C3 para o AL3 por meio do paralelismo, e então restabelecer a energia dos consumidores do ramo AL1-C3, ligando-os a AL2. Durante as transferências em paralelo na rede, foram analisados os regimes de operação apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Regimes de operação durante as transferências em paralelo na RD.

Regime de operação	Tempo (s)
Após a falta permanente	$0,0 \leq t < 3,2$
Paralelismo dos alimentadores AL2 e AL3	$3,2 \leq t < 3,4$
Restabelecimento de energia para AL1-C3	$t \geq 3,4$

Fonte: Próprio autor.

O paralelismo é realizado para $t > 3,0$ s, pois o gerador síncrono modelado parte em $t = 0$ s, de forma que é possível visualizar o transitório de partida da máquina no início da simulação. Por isso, é importante garantir que a rede esteja em regime permanente para verificar nas simulações os transitórios eletromagnéticos que ocorrem em decorrência do paralelismo.

Após a correção do defeito no trecho da rede do AL1, novas manobras podem ser realizadas para que as redes voltem ao seu estado normal de operação. O ATPDraw permite analisar todas as etapas da manobra em uma única simulação, sendo necessário apenas indicar os tempos de fechamento e abertura dos equipamentos.

Neste trabalho, os estudos elétricos são realizados sob os aspectos de carregamento, tensão e proteção, tanto em regime transitório como em permanente. No entanto, por questões de segurança operativa, os paralelismos são executados somente para realização das transferências de carga, retornando-se à configuração radial após as manobras.

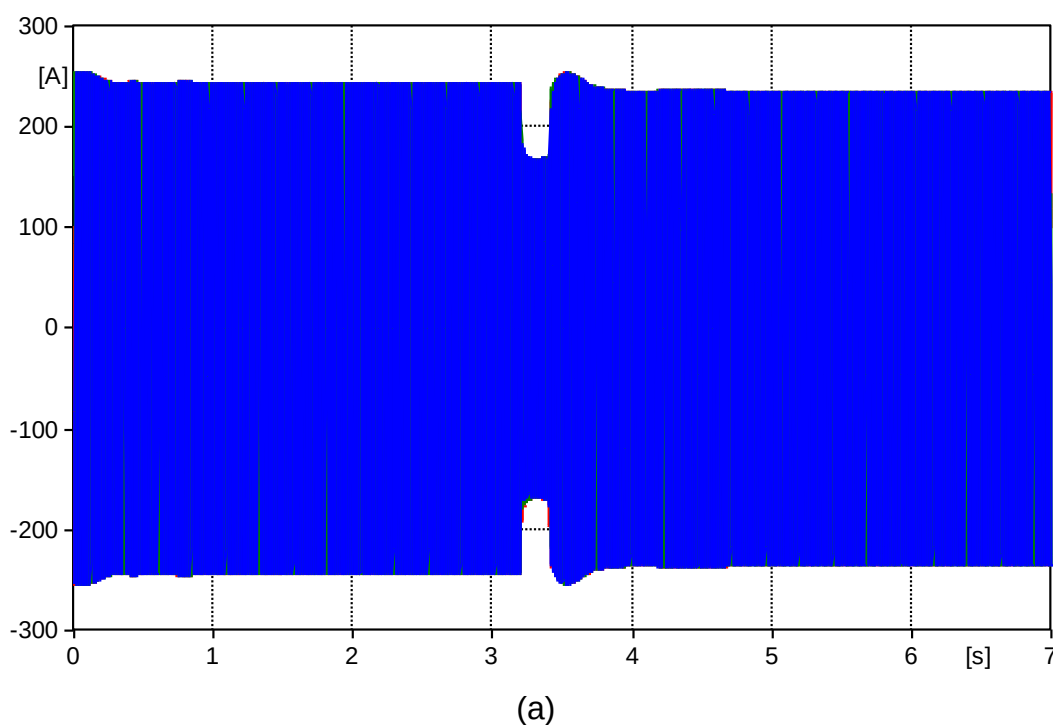
Os resultados das simulações (correntes e tensões) com a RD em situação de contingência apresentada na Figura 4.3 foram avaliados em três pontos principais: chaves de interligação, saída dos alimentadores e sobre as cargas. A análise consiste em verificar o carregamento dos equipamentos envolvidos, afundamentos e sobretensões e valores ajustados nos dispositivos de proteção. Se o estudo não

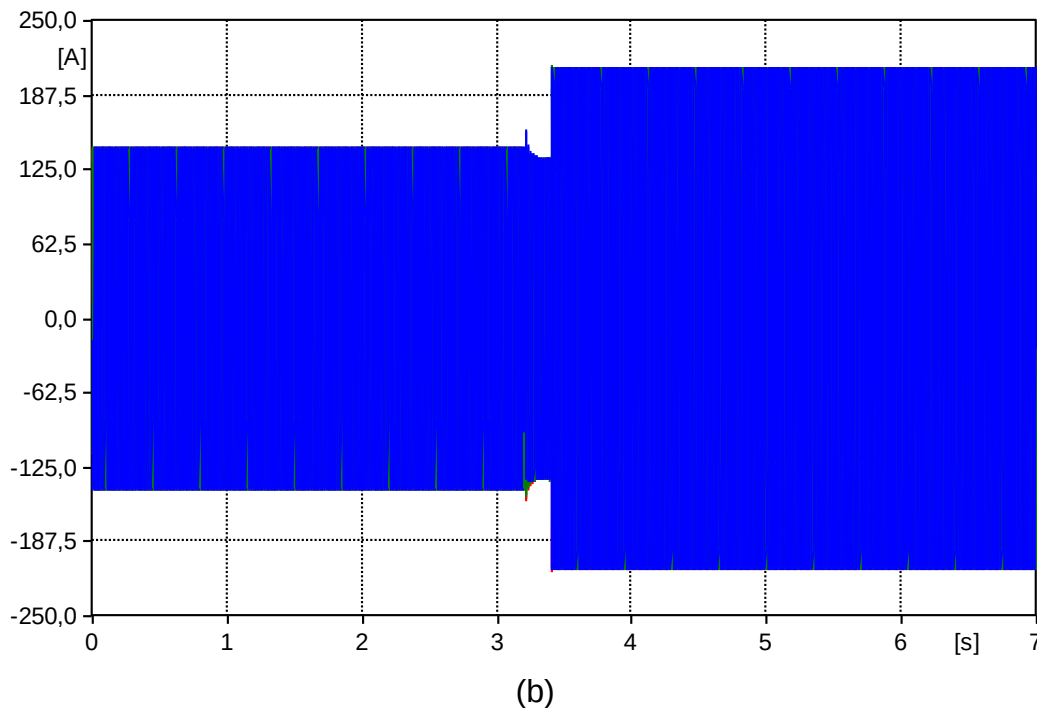
apresentar quaisquer restrições, ele é considerado viável tecnicamente, pois não acarretará sobrecarga e nem distúrbios de tensão ao sistema, além da garantia que não haverá desarme por proteção.

Após a ocorrência da falta, a CH2 e a CH3 abrem para isolar a região defeituosa. As transferências paralelas de carga entre os alimentadores são necessárias para restabelecer o fornecimento de energia para os consumidores representados por AL1-C3, pois, conforme verificado, AL2 não pode receber esta carga sem que parte de sua carga atual seja “aliviada” para outro alimentador. A Figura 4.5 apresenta o comportamento da corrente na saída dos alimentadores AL2 e AL3.

Em regime permanente antes do paralelismo, a corrente do AL1, cujo valor eficaz é 51,15 A, representa as perdas na linha RL1 e o consumo da carga AL1-C1. Esta corrente permanece inalterada durante toda a simulação, pois CH2 e CH3 só podem ser manobras para rede retornar a sua configuração original, após a correção do defeito. A corrente do AL3 é 100,90 A, correspondente ao consumo das cargas AL3-C1 e AL3-C2 e das perdas nas linhas RL6 e RL7. Os consumidores dos ramos AL1-C2 e AL1-C3 estão desligados.

Figura 4.5 – Comportamento da corrente dos alimentadores: (a) AL2; (b) AL3.





Fonte: Próprio autor.

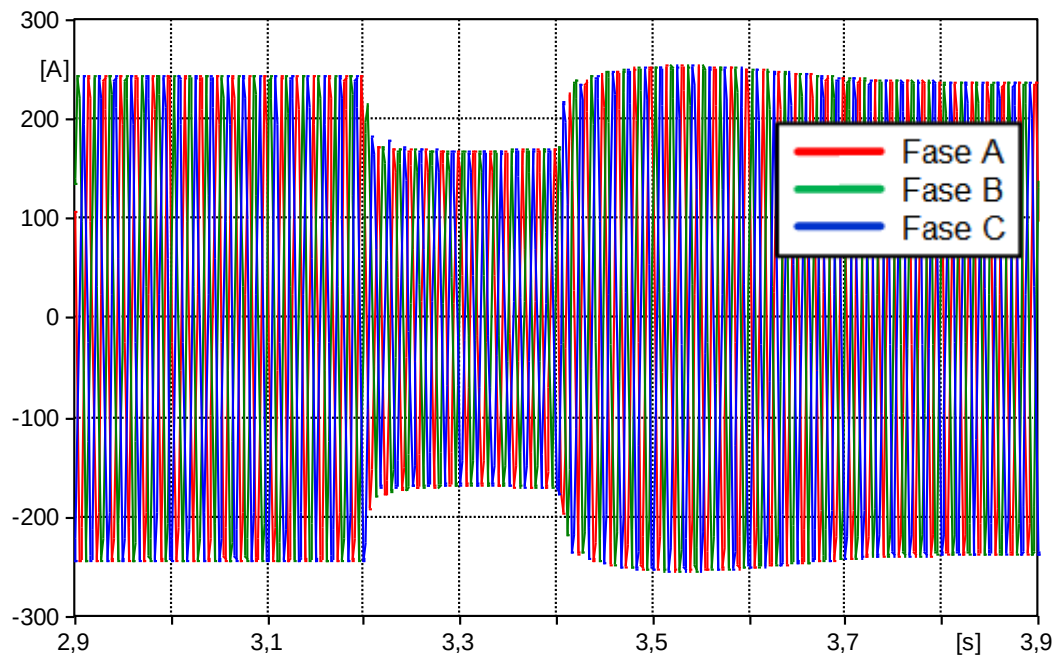
No início da simulação verifica-se um valor eficaz de corrente de 180,50 A que corresponde ao transitório de partida do gerador síncrono. Em regime permanente, antes do paralelismo, a corrente do AL2 é 173,86 A, que corresponde ao consumo das cargas AL2-C1, AL2-C2 e AL2-C3, além das perdas nas linhas RL3, RL4 e RL5.

Durante o paralelismo, que inicia com o fechamento de CH7 em $t = 3,2$ s, e dura 0,2 segundos, verifica-se um pequeno aumento transitório na corrente de AL3 no valor de 112,11 A ($t = 3,21$ s). Neste período, em regime permanente, a corrente verificada nos alimentadores AL2 e AL3 são, respectivamente, 119,71 A e 96,19 A, que corresponde a corrente fornecida às cargas e às linhas das redes dos alimentadores AL2 e AL3 compartilhadas entre ambas as fontes.

Em $t = 3,4$ s, o paralelismo entre AL2 e AL3 é desfeito (abertura de CH6) e a carga AL1-C3 é conectada a AL2 (fechamento de CH4), verifica-se um transitório de 180,72 A ($t = 3,5$ s) em AL2, e outro de 149,83 A ($t = 3,41$ s) em AL3. O transitório de corrente verificado em AL2 ao final do paralelismo é ilustrado em detalhe na Figura 4.6.

Ao final do paralelismo, em regime permanente, a corrente em AL2 é 168,10 A e em AL3 149,22 A. Observa-se, um aumento considerável na corrente de AL3 que recebeu um grande bloco de cargas.

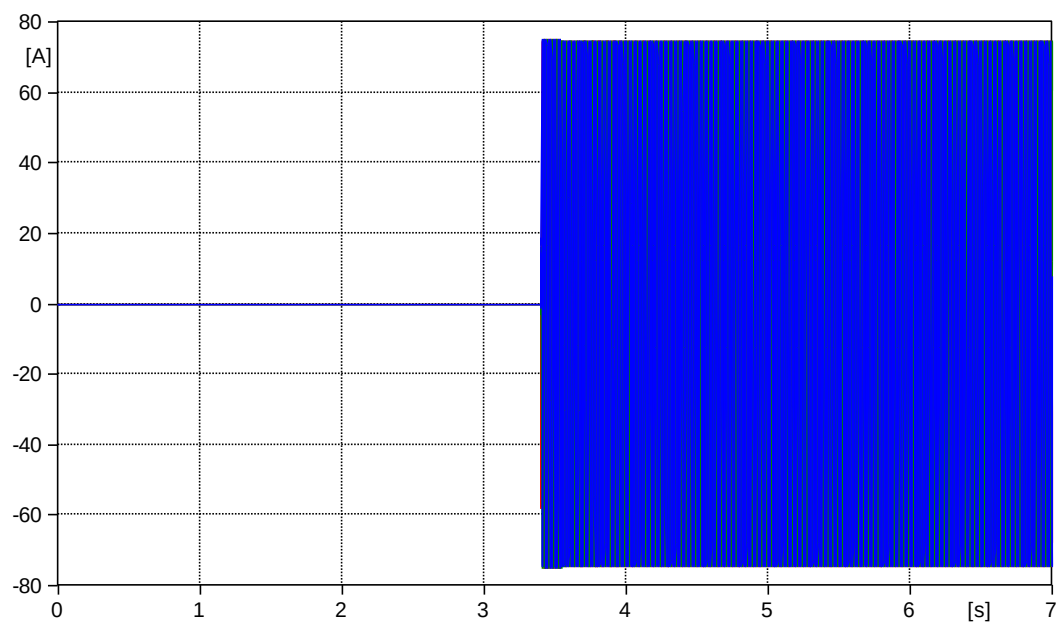
Figura 4.6 – Detalhe da corrente máxima no AL2.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.7 apresenta a corrente em CH4 (NA), que foi fechada em $t = 3,4$ s, para restabelecer a energia dos consumidores do ramo AL1-C3. O transitório de corrente nesta chave não foi muito significativo, atingindo o valor de 53,14 A, e sua corrente em regime permanente é 52,75 A.

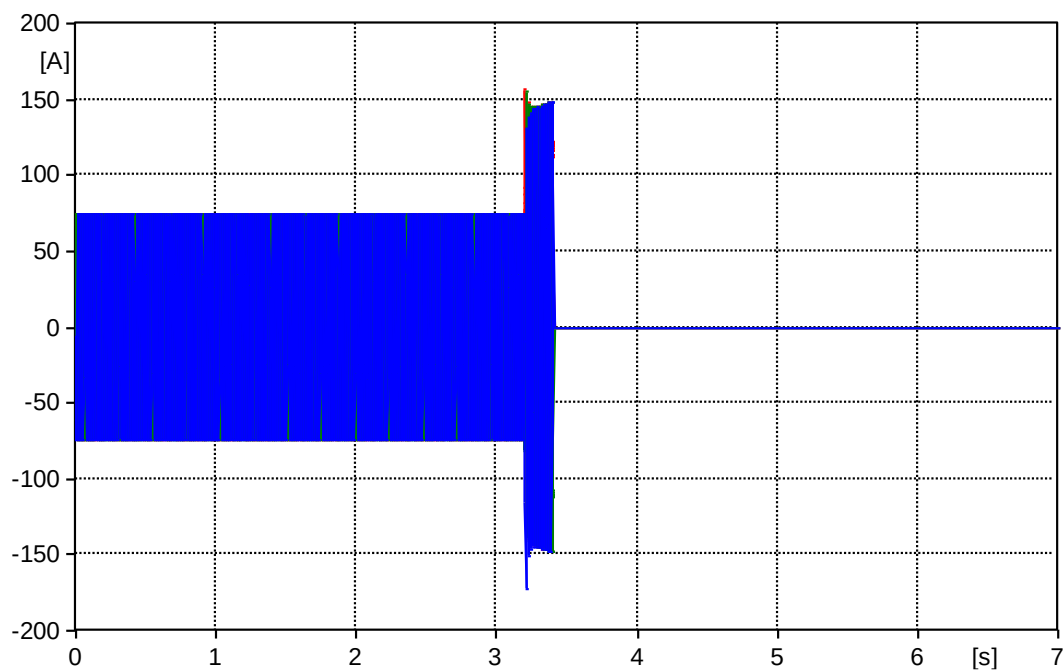
Figura 4.7 – Detalhe da corrente na chave (CH4) ao religar os consumidores.



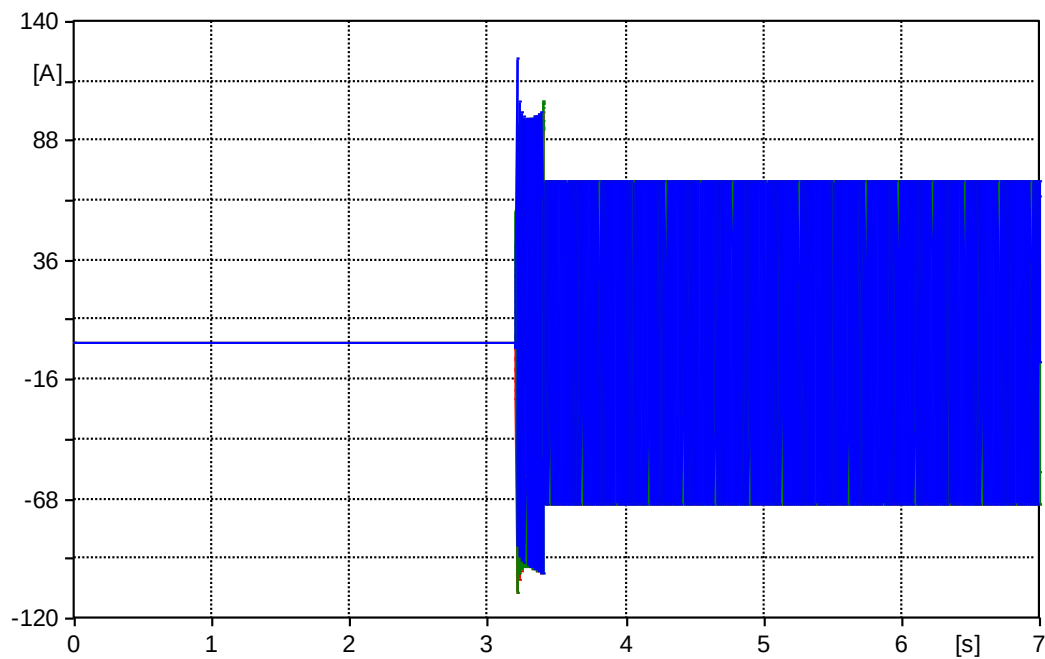
Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.8 mostra a corrente sobre as chaves da rede, comutadas para o paralelismo entre os alimentadores AL2 e AL3.

Figura 4.8 – Comportamento das correntes no instante de comutação das chaves: (a) Corrente na chave CH6; (b) Corrente na chave CH7.



(a)

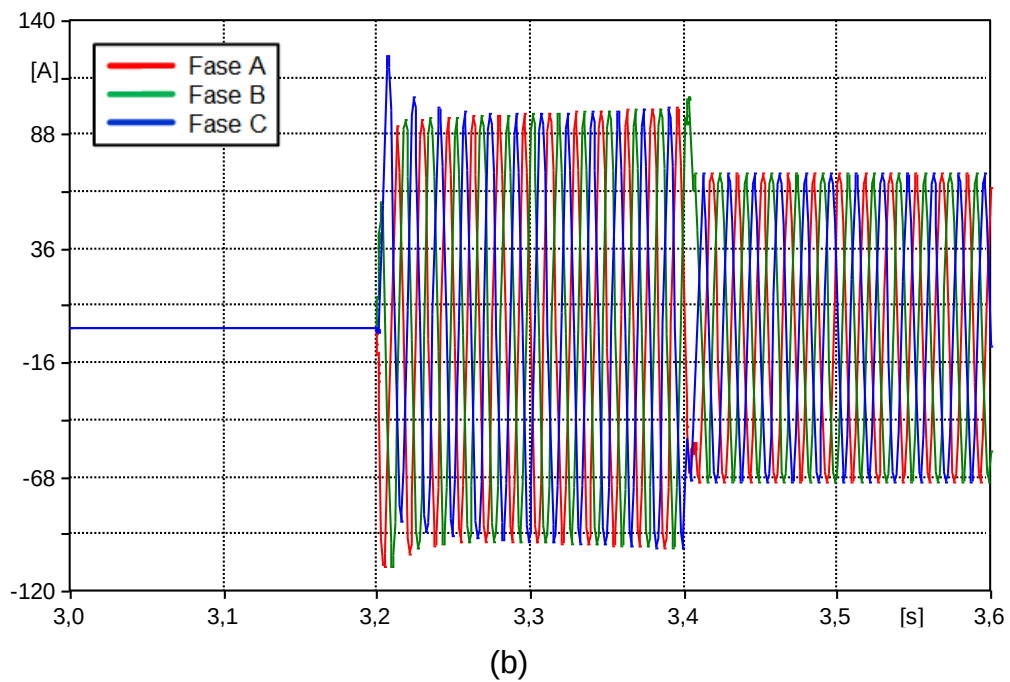
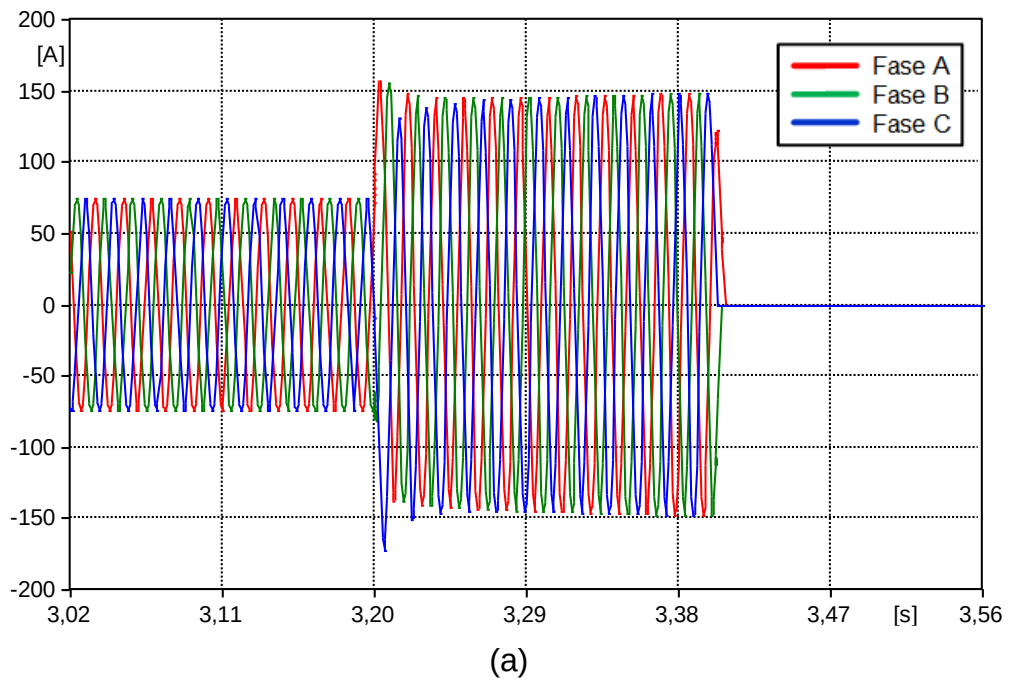


(b)

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.9 ilustra em detalhe o transitório de corrente no momento de início do paralelismo (fechamento de CH7), e de sua finalização (abertura de CH6).

Figura 4.9 – Detalhe dos transitórios de corrente durante o paralelismo nas chaves: (a) CH6; (b) CH7.



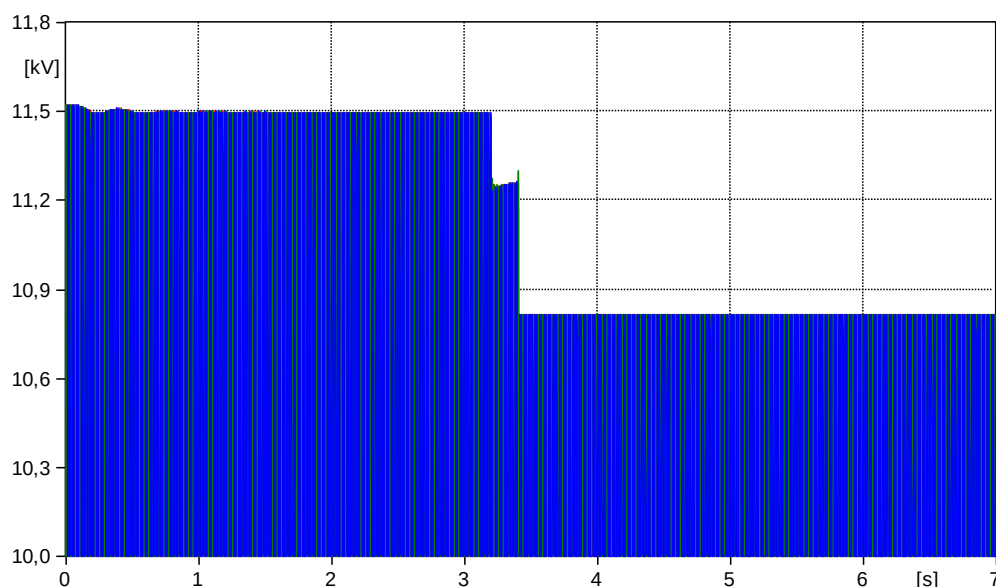
Fonte: Próprio autor.

Antes da transferência da carga AL2-C3, a corrente na chave CH6 (NF) é 52,71 A. No início do paralelismo é possível verificar um transitório de 120,82 A na CH6 e de 87,02 A em CH7 (NA). Durante o paralelismo, em regime permanente, as correntes medidas são 102,47 A na chave CH6, e 69,30 A na chave CH7.

Ao final do paralelismo, verificam-se novos transitórios com valor de 104,19 A para CH6, e 73,77 A para a CH7 durante a comutação das chaves. Depois da transferência das cargas AL2-C3 para o AL3 e, paralelamente, AL1-C3 para o AL2, a corrente na chave CH7 passa a ser 49,59 A em regime permanente.

Durante as transferências paralelas, as cargas sofrem variações de tensão. A Figura 4.10 mostra a oscilação da tensão na carga AL2-C3 que foi transferida do AL2 para o AL3. Embora não tenha ocorrido transitórios significativos nesta carga durante o paralelismo, na partida do gerador síncrono observou-se a maior tensão transitória sobre esta carga (14,11 kV). Após a transferência para AL3 a tensão verificada nesta carga é 13,24 kV em regime permanente.

Figura 4.10 – Detalhe da tensão na carga AL2-C3.

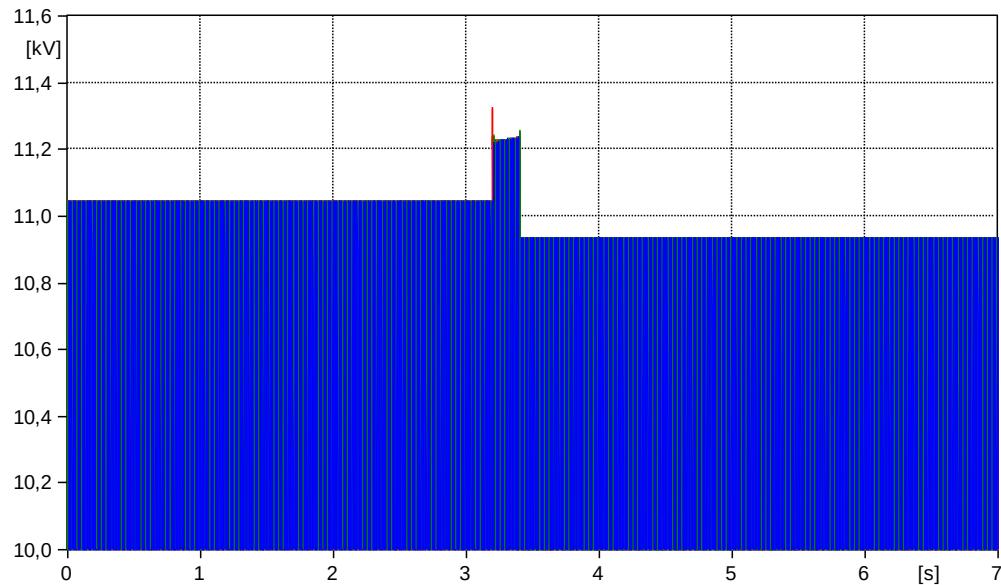


Fonte: Próprio autor.

Nas cargas próximas aos alimentadores também há alteração nos valores de tensão durante as manobras, conforme mostra a Figura 4.11. Observe que ao receber a carga AL2-C3, à medida que a corrente no AL3 aumenta (Figura 4.5(b)), a tensão diminui. Isto acontece em função do aumento do carregamento deste alimentador ao

receber a carga. O transitório de tensão verificado em AL3-C1 foi de 13,87 kV e a tensão em regime permanente ao final do paralelismo é de 13,39 kV.

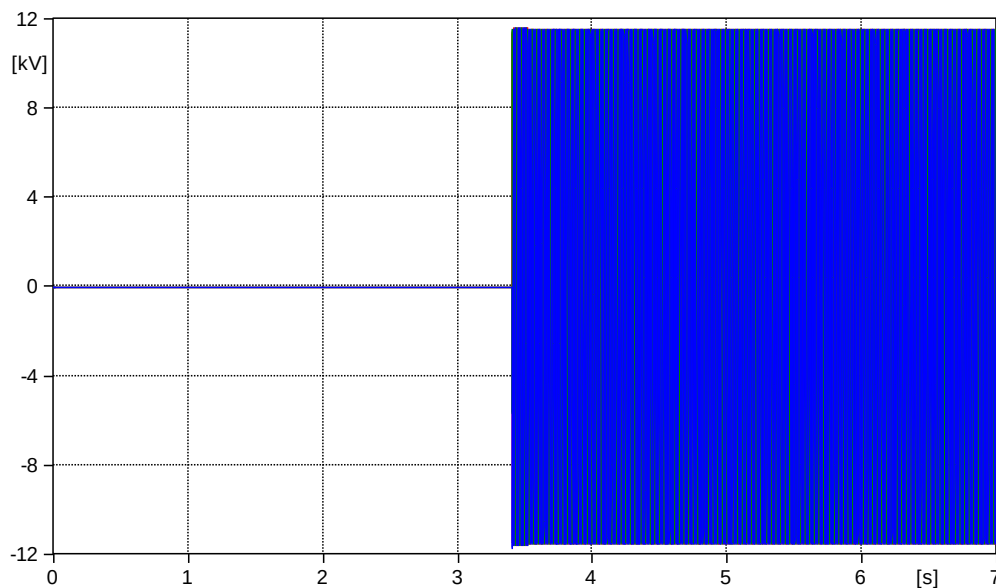
Figura 4.11 – Detalhe da tensão na carga AL3-C1.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.12 ilustra a tensão sobre a carga AL1-C3 transferida para o AL2.

Figura 4.12 – Tensão sobre os consumidores restabelecidos (AL1-C3).

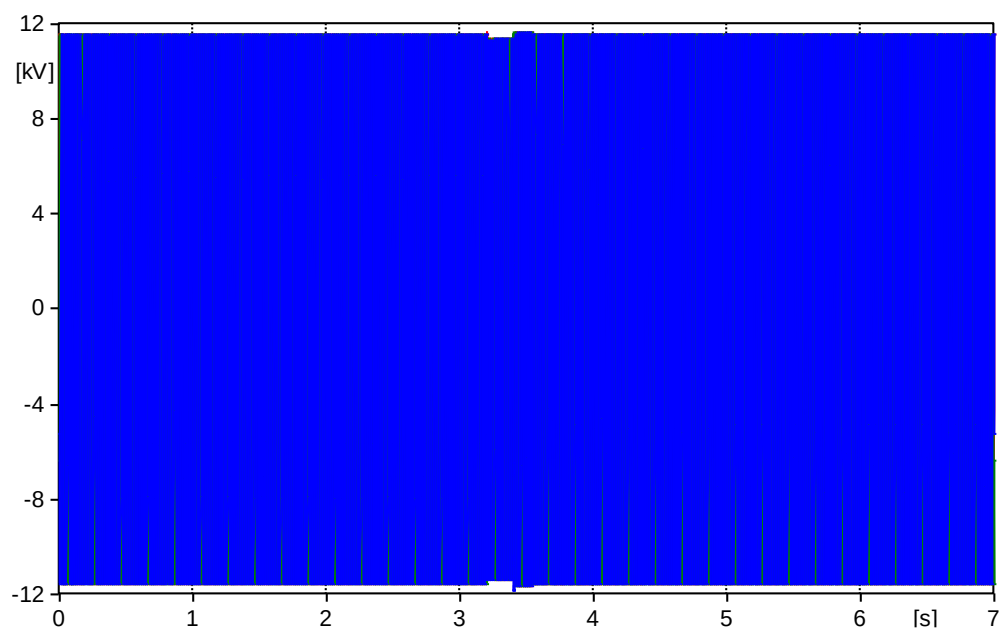


Fonte: Próprio autor.

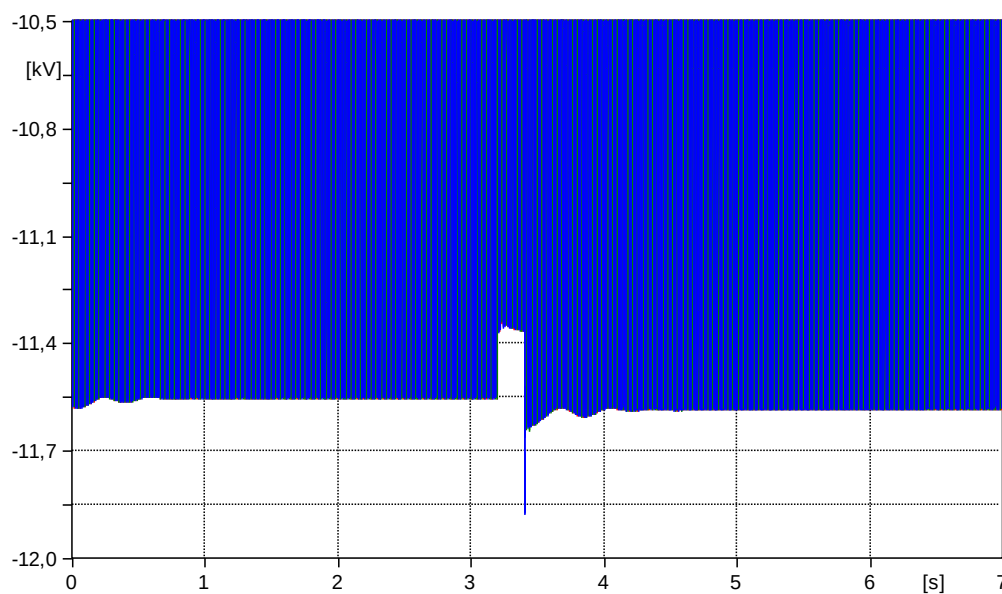
Na Figura 4.12, observa-se um pequeno transitório no valor de 14,39 kV quando a carga AL1-C3 é conectada ao AL2. Sua tensão em regime permanente verificada é de 14,11 kV.

Os piores transitórios de tensão foram verificados na barra onde estão conectados o gerador síncrono e a carga AL2-C2, conforme mostra a Figura 4.13.

Figura 4.13 – (a) Tensão na barra da GD; (b) Detalhe do transitório de tensão na GD.



(a)



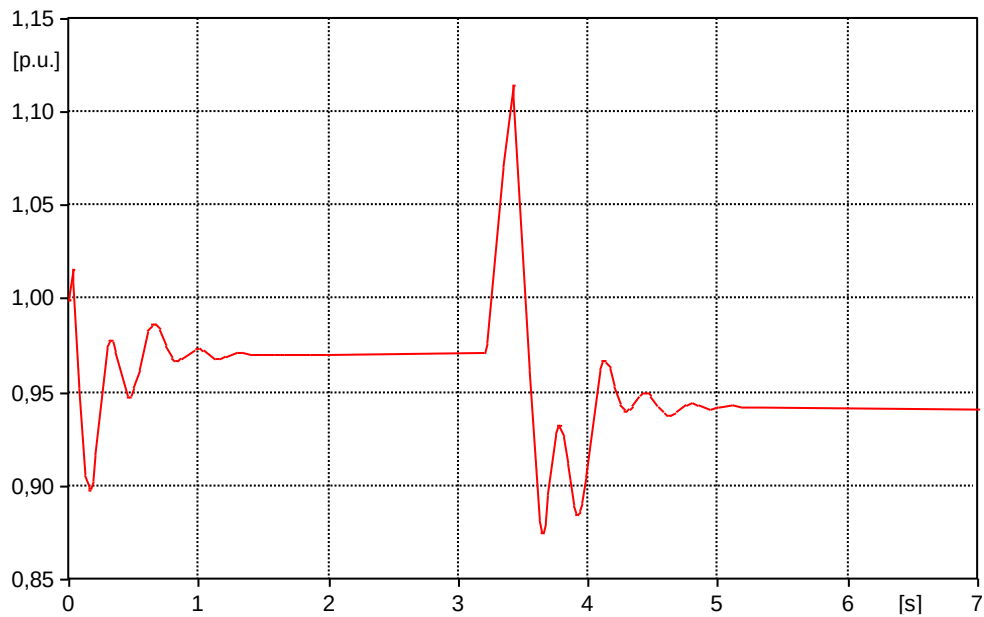
(b)

Fonte: Próprio autor.

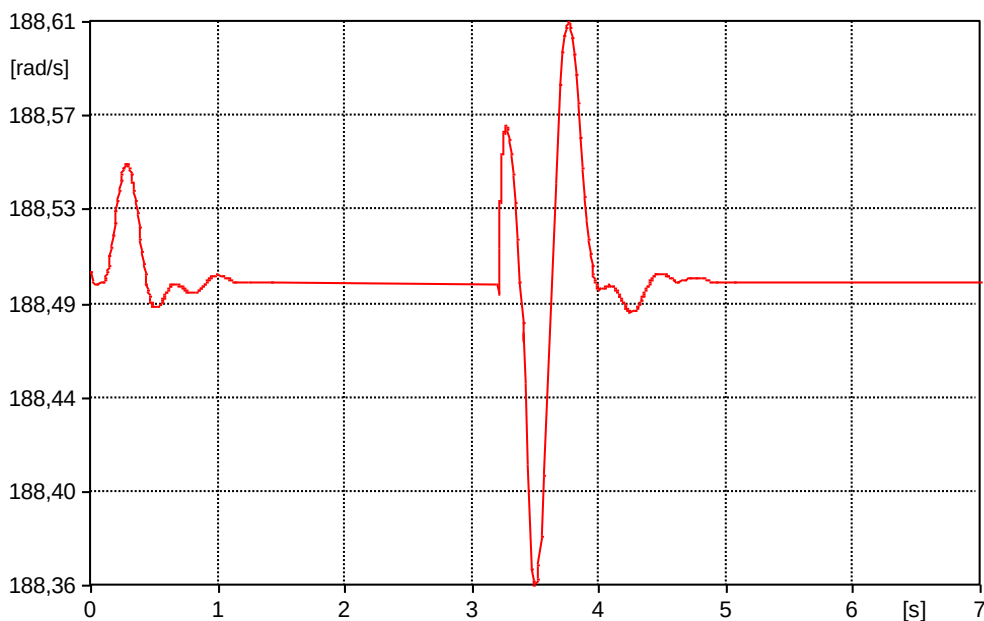
Ao final do paralelismo, o valor de pico em uma das fases da tensão na barra da GD foi de 11,83 kV no ATPDraw, o que equivale a uma tensão eficaz trifásica no valor de 14,49 kV, ou seja, ao limite de 1,05 p.u. estabelecido pelo PRODIST.

A Figura 4.14 mostra a atuação dos reguladores de tensão e velocidade do gerador síncrono.

Figura 4.14 – Atuação dos reguladores: (a) de tensão; (b) de velocidade do gerador síncrono durante a simulação.



(a)



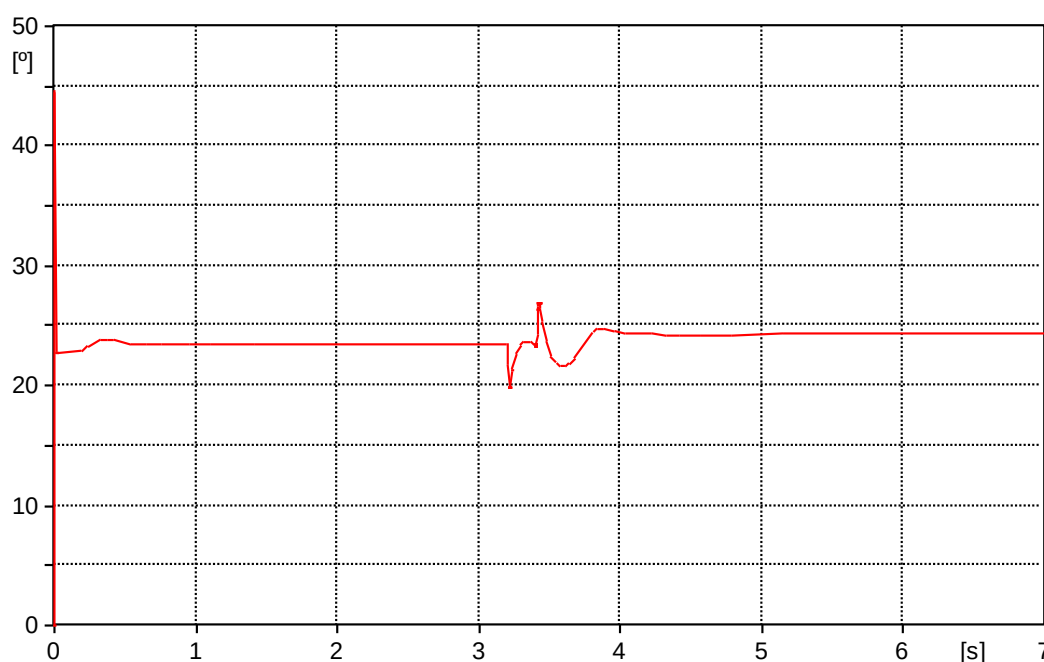
(b)

Fonte: Próprio autor.

É possível observar na Figura 4.14 os transitórios de partida do gerador síncrono. Antes do paralelismo a tensão de excitação no regulador e a velocidade na máquina são, respectivamente, 0,96 p.u. e 188,5 rad/s. As oscilações transitórias mínima e máxima no regulador de tensão da máquina foram 0,87 p.u. e 1,11 p.u., durante o paralelismo dos alimentadores ($3,2 \text{ s} \leq t \leq 3,4 \text{ s}$), e na velocidade foram de 188,36 e 188,61 rad/s. Ao final do paralelismo a tensão do regulador estabilizou em 0,94 p.u. e a velocidade da máquina voltou para a velocidade síncrona (ω_s) de 188,5 rad/s, garantindo desta forma o sincronismo do sistema com a rede.

A Figura 4.15 apresenta as oscilações no ângulo de potência na partida da máquina ($t > 0 \text{ s}$) e durante a comutação das chaves para a realização das transferências de carga.

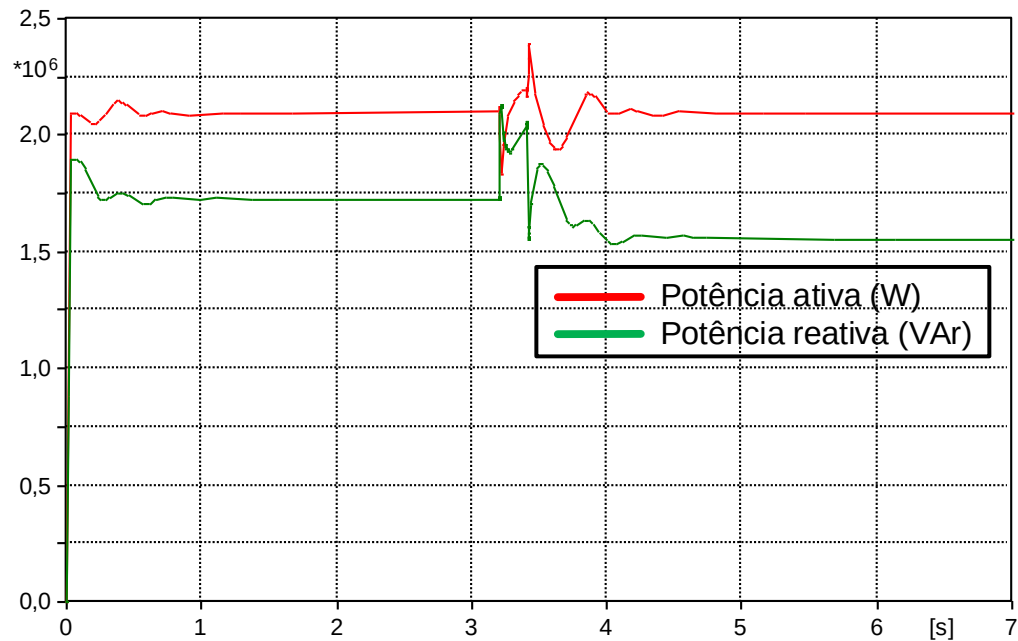
Figura 4.15 – Variações do ângulo de potência (δ) da máquina.



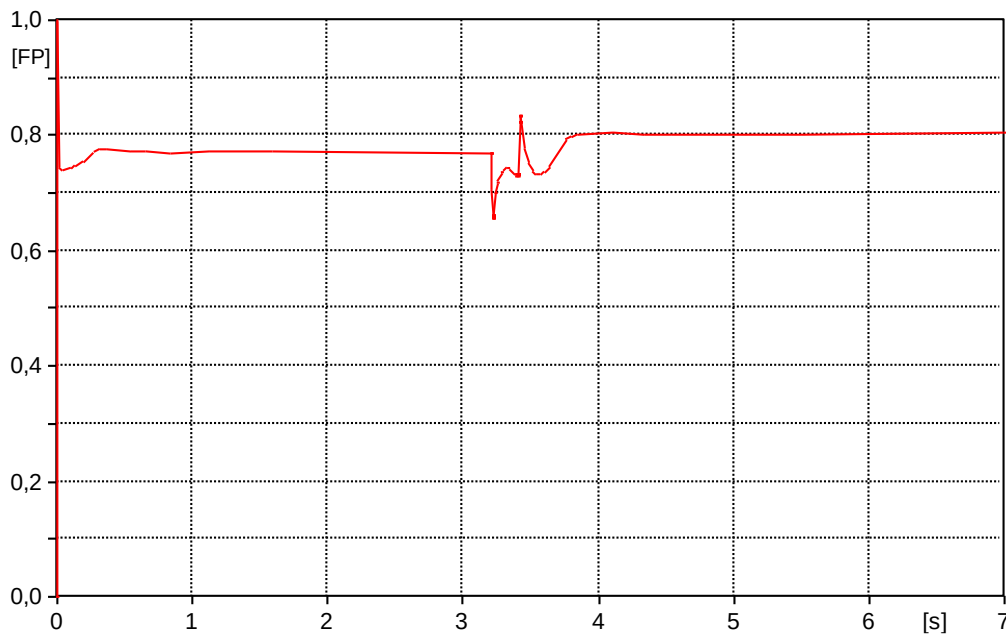
Fonte: Próprio autor.

O ângulo de torque do gerador síncrono verificado nas simulações do ATPDraw é de $23,9^\circ$ antes do paralelismo. Durante as transferências de cargas verifica-se que este ângulo oscila entre $20,13^\circ$ e $27,29^\circ$. Ao final do paralelismo o ângulo δ da máquina estabiliza em $24,65^\circ$.

Figura 4.16 – (a) Potência ativa (P_{GD}) e reativa (Q_{GD}); (b) Fator de potência (FP) do gerador síncrono.



(a)



(b)

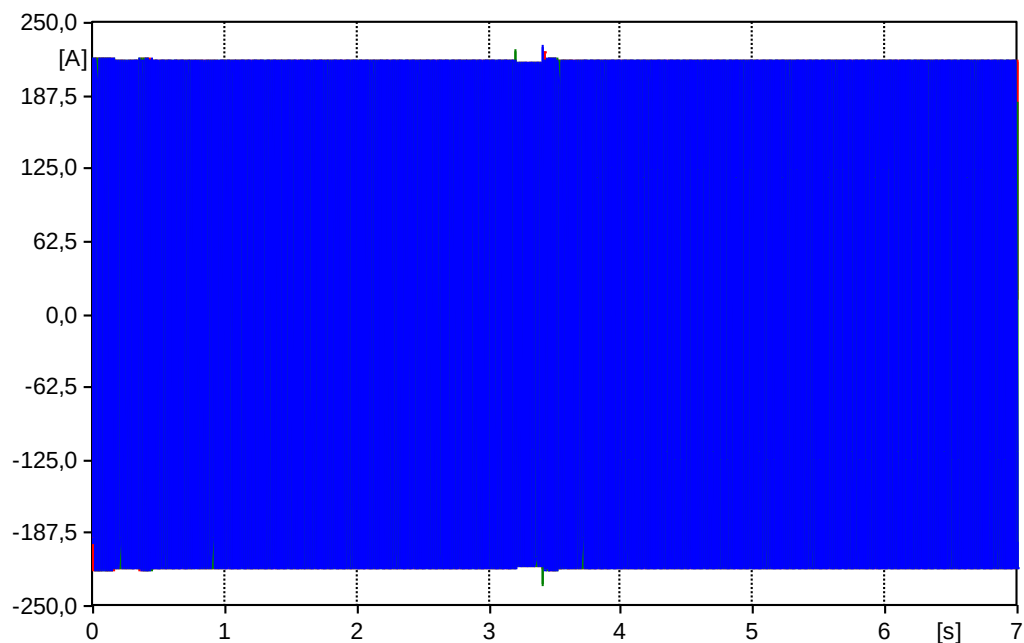
Fonte: Próprio autor.

Antes do paralelismo, os valores de P_{GD} e Q_{GD} verificados foram respectivamente, 2,1 MW e 1,65 MVar, com FP de 0,78. Ao final do paralelismo, com as transferências de cargas entre os alimentadores, a potência ativa manteve seu mesmo valor, no entanto, Q_{GD} medido foi de 1,48 MVar, resultando consequentemente

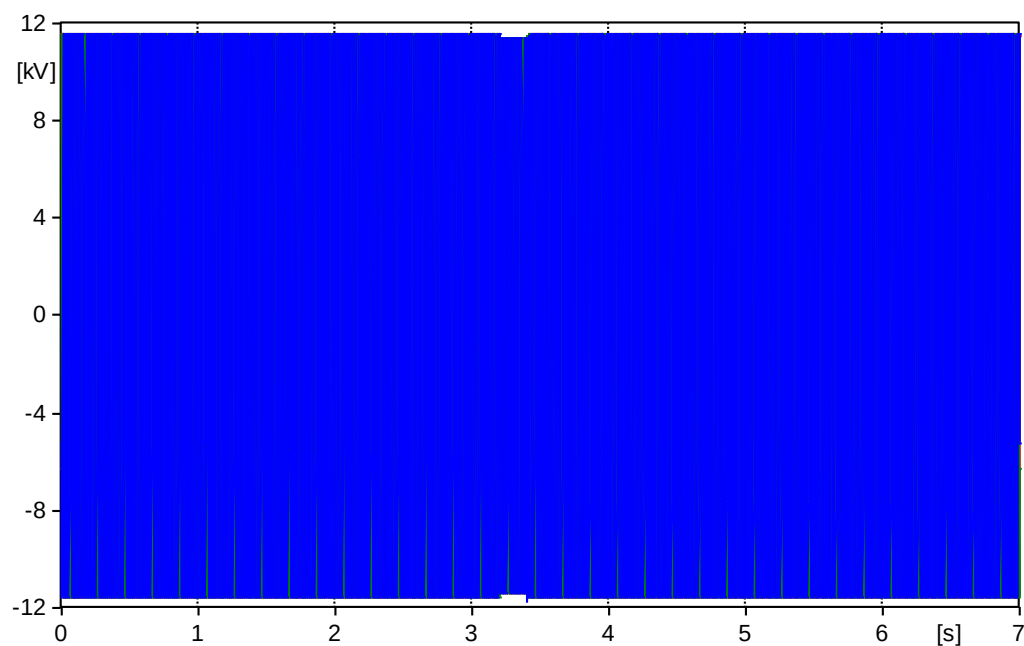
em um FP de 0,82. Com isso, ressalta-se que esta configuração atual da rede é melhor para o proprietário da GD em relação a anterior, pois antes verificou-se uma compensação elevada de reativos pela qual a GD não é paga.

A Figura 4.17 apresenta a corrente e a tensão no banco de capacitores (BC). Observa-se que não ocorrem transitórios significativos de corrente e tensão no BC.

Figura 4.17 – (a) Corrente no BC; (b) Tensão no BC.



(a)

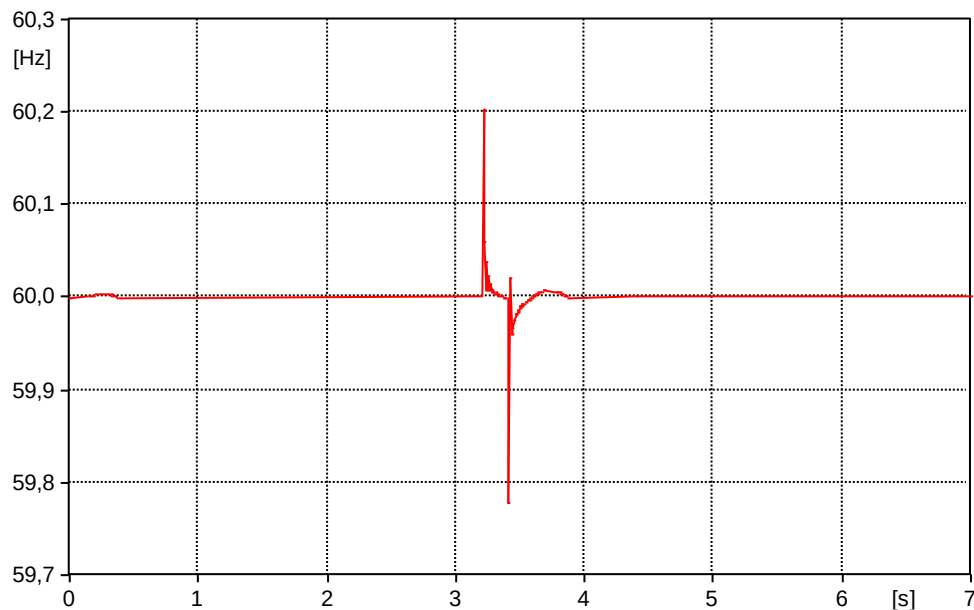


(b)

Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.18 apresenta a frequência do gerador síncrono durante as manobras na rede. Nota-se que os resultados obtidos se mantiveram dentro dos intervalos estipulados pela norma, e que os controladores do gerador mantêm a máquina com sua frequência perfeitamente em 60 Hz.

Figura 4.18 – Frequência do gerador síncrono durante as manobras na rede.



Fonte: Próprio autor.

4.4 VERIFICAÇÃO DAS RESTRIÇÕES TÉCNICAS

Após a realização das simulações, as restrições para o estudo de caso proposto foram analisadas criteriosamente. Na Tabela 4.3 são apresentados os valores das grandezas referentes as restrições técnicas e operacionais que foram verificadas nos alimentadores AL1, AL2 e AL3; nas chaves CH6 e CH7; no banco de capacitores; e no gerador síncrono distribuído. Observa-se que a corrente em AL1 manteve-se a mesma durante toda a simulação, assim como a tensão em AL2-C2 (carga localizada no trecho onde a falta foi considerada) é zero, até a correção da falta. Os demais parâmetros sofrem oscilações que devem respeitar os limites máximos e mínimos de cada restrição apresentada. Não havendo nenhuma violação destas restrições a reconfiguração da rede por meio do paralelismo com sucessivas transferências paralelas das cargas é considerada viável tecnicamente.

Tabela 4.3 – Resultados das restrições do paralelismo de alimentadores para o estudo de caso apresentado.

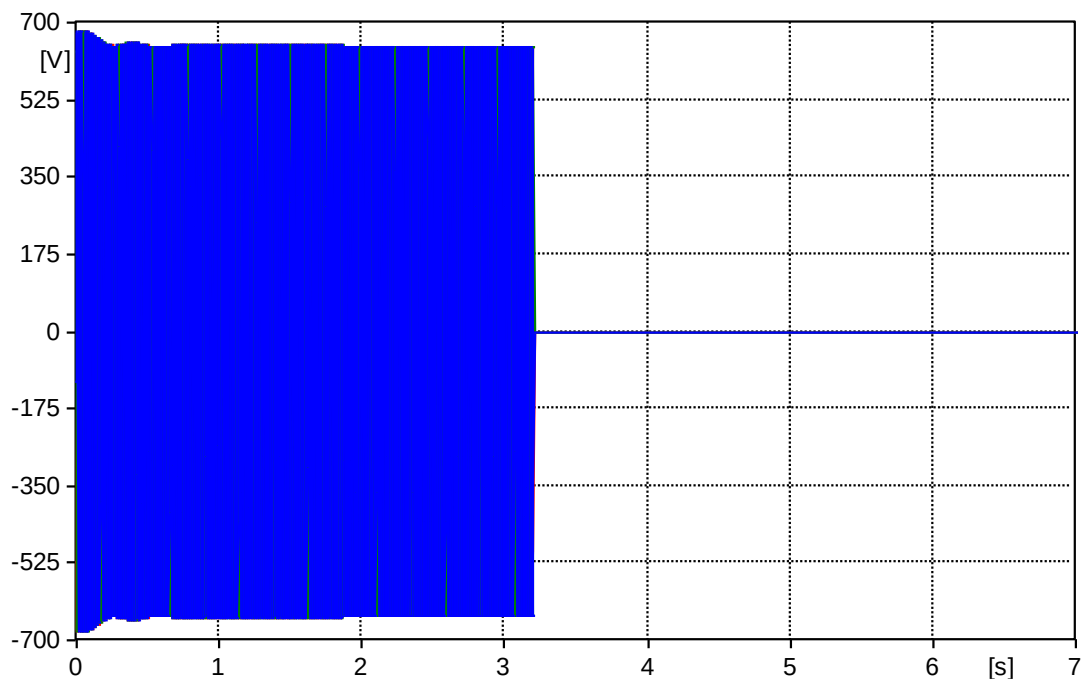
Grandeza verificada	Limite	Situação
Tensões nos nós das cargas (p.u.) $V_{AL1-C1} = 0,99$ $V_{AL1-C2} = 0,00$ $V_{AL1-C3-min} = 1,02; V_{AL1-C3-max} = 1,04$ $V_{AL2-C1-min} = 1,01; V_{AL2-C1-max} = 1,03$ $V_{AL2-C2-min} = 1,01; V_{AL2-C2-max} = 1,05$ $V_{AL2-C3-min} = 0,96; V_{AL2-C3-max} = 1,02$ $V_{AL3-C1-min} = 0,97; V_{AL3-C1-max} = 1,01$ $V_{AL3-C2-min} = 0,96; V_{AL3-C2-max} = 1,01$	$V_{min} \geq 0,93 \text{ p.u.}$ $V_{max} \leq 1,05 \text{ p.u.}$	Ok.
Corrente máxima do circuito $I_{AL1} = 51,15 \text{ A}$ $I_{AL2} = 180,72 \text{ A}$ $I_{AL3} = 149,83 \text{ A}$ $I_{CH6} = 120,82 \text{ A}$ $I_{CH7} = 87,02 \text{ A}$	$I_{AL1-max} \leq 314 \text{ A}$ $I_{AL2-max} \leq 203 \text{ A}$ $I_{AL3-max} \leq 314 \text{ A}$ $I_{CH6-max} \leq 400 \text{ A}$ $I_{CH7-max} \leq 400 \text{ A}$	Ok.
Limite de corrente $I_{AL2-max} = 180,72 \text{ A}$ $I_{CH6-max} = 120,82 \text{ A}$	$I_{AL2-prot} \leq 203 \cdot 0,9 \leq 182,7 \text{ A}$ $I_{CH6-prot} \leq 400 \cdot 0,9 \leq 360 \text{ A}$	Ok.
Defasagem angular na chave NA $\Delta\varphi_{CH7} = 2,16^\circ$	$\Delta\varphi_{max} \leq 3^\circ$	Ok.
Diferença de tensão na chave NA $\Delta V_{CH7} = 452,55 \text{ V}$	$\Delta V_{max} \leq 1,00 \text{ kV}$	Ok.
Banco de capacitores $I_{BC} = 164,53 \text{ A (transitório)}$ $V_{BC} = 14,39 \text{ kV (transitório)}$	$I_{max} \leq 1,44 \cdot 150,61 \leq 216,88 \text{ A}$ $V_{max} \leq 1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 13,8 \leq 23,42 \text{ kV}$	Ok.
Potência nominal da GD $S_{GD,n} = 2,67 \text{ MVA (antes do paralelismo)}$ $S_{GD,n} = 2,57 \text{ MVA (após do paralelismo)}$	$S_{GD,n} \leq 5,00 \text{ MVA}$	Ok.
Frequência da GD $f_{GD-min} = 59,75 \text{ Hz}$ $f_{GD-max} = 60,20 \text{ Hz}$	Por no máximo 30 s: $f_{min} \geq 59,5 \text{ Hz}$ $f_{max} \leq 60,5 \text{ Hz}$	Ok.

Fonte: Próprio autor.

Conforme é apresentado na Tabela 4.3 e nas análises dos transitórios feitas na seção anterior, observa-se que as grandezas verificadas (corrente máximas nos elementos da rede, níveis de sobrecarga, tensões nos nós das cargas da rede, defasagem angular e diferença de tensão na chave NA, tensões e correntes no BC durante os transitórios, potência nominal e frequência da GD) estão dentro do intervalo estabelecido pelas restrições técnicas. Por isso, o estudo é considerado viável.

A Figura 4.19 apresenta ainda a diferença de tensão na CH7 (NA), que foi fechada em $t = 3,2$ s para iniciar o paralelismo entre os alimentadores AL2 e AL3, não ocasionando violação das restrições.

Figura 4.19 – Diferença de tensão na chave CH7.



Fonte: Próprio autor.

A Figura 4.20 apresenta a configuração da RD em situação de contingência após as transferências paralelas da carga. Os círculos em vermelho ilustram as chaves que foram abertas após a ocorrência da falta e os quadrados em verde ilustram as chaves manobradas para reconfigurar a rede e restabelecer a energia de AL1-C3.

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta, que consiste em utilizar a técnica de paralelismo de redes, através de transferências paralelas da carga entre os alimentadores da RD, para restabelecer o fornecimento de energia ao maior número possível de consumidores após uma contingência no SD.

Constatou-se que sem as transferências paralelas da carga na RD, não seria possível restabelecer a energia aos consumidores fora da região defeituosa, mas que também foram desenergizados pela atuação dos dispositivos de proteção do sistema, pois antes de conectá-los a AL2 era necessário aliviar parte das cargas deste alimentador para outro. Desta forma, colocando o AL2 em paralelo com o AL3 foi possível transferir a carga AL2-C3 para o AL3 e, no final da manobra, restabelecer a energia dos consumidores, representados por AL1-C3, sem provocar novos desligamentos na rede, e sem violar as restrições técnicas. Além disso, restringiu-se a área afetada pelo defeito a menor parte possível do sistema e diminui-se o número de consumidores desenergizados, melhorando os índices de qualidade e continuidade deste SD.

Durante a reconfiguração da RD, as tensões das redes primárias mantiveram-se dentro da faixa considerada adequada pelo órgão regulamentador. Nesta simulação, a maior tensão verificada foi 14,49 kV (ou 1,05 p.u.), no nó onde estão conectados o gerador síncrono distribuído e a carga AL2-C2.

Nos diferentes regimes de operação, as correntes nos elementos da rede não violaram a capacidade nominal dos condutores utilizados e nem o limite de ajuste dos relés de sobrecorrente. Da mesma forma, as diferenças de tensão e de ângulo na interligação dos alimentadores mantiveram-se dentro da faixa estabelecida.

A potência fornecida pela GD manteve-se abaixo de seu valor nominal, e pôde-se verificar neste estudo a atuação dos reguladores de tensão e velocidade na partida da máquina (início da simulação), bem como dos transitórios eletromagnéticos decorrentes do paralelismo ($3,2 \text{ s} \leq t \leq 3,4 \text{ s}$). Portanto, como os resultados das simulações não apresentaram nenhuma violação o estudo de caso foi considerado viável tecnicamente.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia para análise da viabilidade técnica dos paralelismos em redes de distribuição em situação de contingência. O trabalho tratou uma particularidade ao considerar os alimentadores do sistema de distribuição com seus carregamentos elevados, de forma que foi necessário realizar consecutivas transferências de carga em paralelo para restabelecer a energia elétrica dos consumidores, que se encontravam fora da região defeituosa.

Esta metodologia é uma evolução dos trabalhos de Santos (2008, 2013), Pftischer (2013) e Garcia (2015), que não avaliaram os efeitos da técnica do paralelismo com sucessivas transferências paralelas de carga entre os alimentadores do SD. A modelagem da rede deste trabalho contempla ainda as análises sobre um gerador síncrono distribuído e seus controles, bem como a presença de um banco de capacitores. Com isso, este trabalho procurou preencher esta lacuna, visto que este tema ainda é muito incipiente na literatura, necessitando de mais estudos.

Em regime normal de operação, reconfiguração de RDs altera a topologia da rede em função de manobras nas chaves, permitindo a transferência de carga de um alimentador para o outro a fim de atingir a melhor eficiência possível na operação da rede, com maior confiabilidade e segurança. No processo de reconfiguração emergencial da RD, em função da presença de determinada contingência, a técnica do paralelismo de redes apresenta a vantagem de, respeitados os critérios de avaliação, evitar o desligamento de novos consumidores durante a realização das manobras.

A análise das restrições dos limites de tensão, de sobrecorrente, dos ajustes de proteção nos elementos da rede e das diferenças de tensão e de ângulo de fase entre os alimentadores durante a realização das manobras não foram violadas. Durante os chaveamentos para realização das manobras na rede foi possível verificar a atuação satisfatória dos reguladores de tensão e velocidade do gerador síncrono, garantindo a estabilidade da máquina. A modelagem destes elementos é muito importante do ponto de vista do estudo de respostas dinâmicas no sistema. Os transitórios eletromagnéticos observados não comprometeram a operação da GD e também não violaram restrições técnicas do banco de capacitores.

Portanto, o estudo de caso proposto foi considerado viável tecnicamente, pois todas as restrições foram atendidas. Com isso, observou-se que, efetivamente, os paralelismos de redes com transferências da carga em cascata demonstram ser uma técnica que agiliza o restabelecimento de energia elétrica em casos de contingência, minimizando a área afetada pelo defeito e o número de cliente desatendidos.

Com a utilização da metodologia proposta neste trabalho, pode-se aumentar o número de soluções possíveis nos processos de reconfiguração da RD, ao se verificar a viabilidade das transferências paralelas de carga entre os alimentadores. No contexto das *smart grids* e no desenvolvimento da técnica de *self-healing*, a utilização desta ferramenta contribuirá para a reconfiguração automática da rede em tempo real, garantindo um menor tempo de interrupção aos consumidores a serem manobrados e melhorando os índices de qualidade do sistema.

5.1 SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Como sugestões para o desenvolvimento da pesquisa apresentada, sugere-se alguns trabalhos futuros, visando complementar e aperfeiçoar a utilização da técnica de transferências paralelas da carga em redes de distribuição, destacando-se:

- Desenvolvimento de algoritmos de otimização que identifiquem a melhor sequência de manobras de paralelismo com transferências em cascata das cargas no processo de *self-healing* em uma RD em situação de contingência;
- Análise da metodologia proposta contemplando a inserção de mais alimentadores e outras fontes de geração distribuída, bem como outros dispositivos de controle Volt-Var no sistema;

5.2 PUBLICAÇÕES RELACIONADAS AO TRABALHO

ORTIZ, M. S. et al. **Análise da Viabilidade Técnica de Paralelismo de Redes para Transferências de Carga em Situações de Contingências Usando o Software ATPDraw**. XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI 2017). **Anais...** SBAI, out. 2017. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/sbai17/papers/paper_559.pdf>.

ORTIZ, M. S. et al. **Analysis of the Technical Feasibility of Network Parallelism for Load Transfers in Contingency Situations Using the Software ATPDraw**. 10th Seminar on Power Electronics and Control (SEPOC 2017). **Anais...** SEPOC, out. 2017. Disponível em: <<http://coral.ufsm.br/sepoc/sepoc2017/index.php/allmedia>>.

ORTIZ, M. S. et al. **Analysis of the Technical Feasibility of Network Parallelism for Load Transfers in Contingency Situations**. 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition – Latin America (T&D-LA 2018). **Anais...** IEEE, set. 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8511760/>>.

ORTIZ, M. S. et al. **Electromagnetic Analysis of Load Transfers in Smart Grids**. 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies – Latin America (ISGT-LA 2019). Artigo aprovado e aguardando apresentação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR5282: Capacitores de Potência em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal acima de 1000 V – Especificação**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.].

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) - Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - ANEEL**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/modulo-8>>. Acesso em: 30 maio. 2019.

ARRUDA, E. F. DE. **Análise de distúrbios relacionados com a qualidade da energia elétrica utilizando a transformada Wavelet**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 7 abr. 2003.

ATP-EMTP. **ATP-EMTP – Alternative Transients Program**. Disponível em: <<https://www.emtp.org/>>. Acesso em: 6 jun. 2019.

ATPDRAW. **ATPDraw Home**. Disponível em: <<http://www.atpdraw.net/index.php>>. Acesso em: 5 jun. 2019.

BERMAN, A.; MARKUSHEVICH, N. **Analysis of three-phase parallel distribution feeders fed from different substations**. IEEE PES T&D 2010. **Anais...IEEE**, 2010Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/5484260/>>

BERNARDON, D. P. et al. **Modelagem e Aplicação do Programa ATP para Estudos de Paralelismo nas Redes de Distribuição Atendidas por Subestações de Diferentes Fontes**. XVII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica - XVII SENDI. **Anais...Belo Horizonte, MG: 2006**Disponível em: <<http://www.mfap.com.br/pesquisa/arquivos/20081219104438-QEE01-0290.pdf>>. Acesso em: 29 maio. 2019

BERNARDON, D. P. **Novos métodos para reconfiguração das redes de distribuição a partir de algoritmos de tomadas de decisão multicriteriais**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

BERNARDON, D. P. et al. **Sistemas de distribuição no contexto das redes elétricas inteligentes: uma abordagem para reconfiguração de redes**. 1. ed. Santa Maria: AGEPOC, 2015.

BERNARDON, D. P.; VEIGA, F. D. **Use of the ATP Draw Software for Studies of Parallelism in Distribution Networks Served by Different-Source Substations**. 2007 International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives. **Anais...IEEE**, abr. 2007Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4380206/>>

BORGES, H. F. **Otimização do processo de restabelecimento de energia em sistemas de distribuição de grande porte utilizando chaves automáticas**. São Carlos: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 30

set. 2013.

BROWN, R. E. **Network reconfiguration for improving reliability in distribution systems**. 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491). **Anais...IEEE**, 2003Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1271020/>>. Acesso em: 24 maio. 2019

BROWN, R. E. **Impact of Smart Grid on distribution system design**. 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. **Anais...IEEE**, jul. 2008Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4596843/>>

CHEN, T.-H. et al. Feasibility Study of Upgrading Primary Feeders From Radial and Open-Loop to Normally Closed-Loop Arrangement. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 19, n. 3, p. 1308–1316, ago. 2004.

FALCÃO, D. M. **Integração de Tecnologias para Viabilização da Smart Grid**. III Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. **Anais...2010Disponível em:** <http://www.eletrica.ufpr.br/odilon/te061/artigo_SMART_GRID_SBSE2010_DjalmaFalcão.PDF>. Acesso em: 25 nov. 2018

FARHANGI, H. Smart Grid. In: **Encyclopedia of Sustainable Technologies**. [s.l.] Elsevier, 2017. p. 195–203.

FERREIRA, D. D. **Análise de Distúrbios Elétricos em Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro, RJ: [s.n.]. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_d/DantonDiegoFerreira.pdf>. Acesso em: 29 maio. 2019a.

FERREIRA, F. A. L. **Metodologia para reconfiguração de redes de distribuição trifásicas assimétricas e não balanceadas com geração distribuída**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2010b.

FONSECA, J. R. L. DA. **Aplicação da técnica de self-healing na reconfiguração automática de redes elétricas utilizando o padrão IEC 61850**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, RN, 2017.

GARCIA, I. G. B. et al. **Studies of parallelism in distribution network served by different-source substations using software ATPDraw**. 2013 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies (ISGT Latin America). **Anais...IEEE**, abr. 2013Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6554405/>>

GARCIA, I. G. B. **Análise de paralelismo para reconfiguração de redes de distribuição com geração distribuída usando software ATPDRAW**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

GARCIA, V. J. **Metaheurísticas multiobjetivo para o problema de restauração do serviço em redes de distribuição de energia elétrica**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2005.

HUANG, W. T. et al. **Assessment of upgrading existing primary feeders from radial to normally closed loop arrangement**. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition. **Anais...IEEE**, 2002Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/1177789/>>

IEEE STD 1159TM. **IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality**. [s.l: s.n.].

KAGAN, N.; OLIVEIRA, C. C. B. DE; ROBBA, E. J. **Introdução aos sistemas de distribuição de energia elétrica**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].

KRÄULICH, L. **Análise estocástica de transitórios em subestações utilizando o Método de Monte Carlo integrado ao ATP**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

LEITE, J. B. **Desenvolvimento de um sistema de gerenciamento de energia (EMS - energy management system) para a rede elétrica inteligente (smart grid)**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2015.

LOPES, G. S. **Reconfiguração de redes de distribuição em situações de contingências considerando operação ilhada de PCH**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

MADANI, V. et al. Distribution Automation Strategies Challenges and Opportunities in a Changing Landscape. **IEEE Transactions on Smart Grid**, v. 6, n. 4, p. 2157–2165, jul. 2015.

MADRUGA, E. P. **Metodologia para análise da estabilidade angular em sistemas de distribuição com geração distribuída**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2018.

MELLO, A. P. C. DE. **Reconfiguração de redes de distribuição considerando multivariáveis e geração distribuída**. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2014.

MOURA, F. A. M. **Geração Distribuída - Impactos e Contribuições para a Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica dos Sistemas Elétricos - Uma análise através do ATP-EMTP**. [s.l.] Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

OLIVEIRA, J. M. DE; PEREIRA, P. R. DA S.; RESENER, M. **A methodology for the analysis of technical feasibility of distribution networks parallelism**. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE). **Anais...IEEE**, maio 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8395740/>>. Acesso em: 24 abr. 2019

ORTIZ, M. DOS S. et al. **Analysis of the Technical Feasibility of Network Parallelism for Load Transfers in Contingency Situations**. 2018 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exhibition - Latin America (T&D-LA). **Anais...IEEE**, set. 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8511760/>>. Acesso em: 24 mar. 2019

PAULILLO, G.; TEIXEIRA, M. D.; BACCA, I. Capítulo XI - Transitórios. **Revista O Setor Elétrico**, v. 94, n. 185–214, p. 42–47, 2013.

PFITSCHER, L. L. et al. **Studies on parallelism of feeders for automatic reconfiguration of distribution networks**. 2012 47th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). **Anais...IEEE**, set. 2012aDisponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6398413/>>

PFITSCHER, L. L. et al. **A tool for real time analysis of parallelism of distribution networks**. 2012 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications. **Anais...IEEE**, nov. 2012bDisponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6451396/>>

PFITSCHER, L. L. **Reconfiguração Automática das Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Monitoramento em Tempo Real**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2013.

PFITSCHER, L. L. et al. Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time. **Electric Power Systems Research**, v. 97, p. 84–92, abr. 2013a.

PFITSCHER, L. L. et al. A methodology for real time analysis of parallelism of distribution networks. **Electric Power Systems Research**, v. 105, p. 1–8, 1 dez. 2013b.

SANTO, K. G. DI. **Gestão ativa da demanda de energia elétrica para consumidores inseridos em redes inteligentes**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 24 jul. 2018.

SANTOS, M. R. DOS. **Paralelismo de alimentadores através de seccionadoras de vis-à-vis na rede aérea primária de distribuição**. São Paulo: Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da Universidade de São Paulo, 15 maio 2008.

SANTOS, M. R. DOS. **Metodologias para execução de manobras de paralelismo em redes aéreas de distribuição na operação de tempo real**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2013.

SOARES, A. B. DE J. **Estudo de paralelismo de alimentadores radiais de sistemas de distribuição de energia elétrica**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2012.

SPERANDIO, M. **Planejamento da automação de sistemas de manobra em redes de distribuição**. [s.l.] Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2008, 2008.

STRASSER, T. et al. A Review of Architectures and Concepts for Intelligence in Future Electric Energy Systems. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 62, n. 4, p. 2424–2438, abr. 2015.

TESAROVA, M.; VYKUKA, R. **Impact of Distributed Generation on Power Flows Along Parallely Operated MV Feeders**. 2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe). **Anais...IEEE**, jun. 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8493640/>>

WANG, Z.; WANG, J. Self-Healing Resilient Distribution Systems Based on Sectionalization Into Microgrids. **IEEE Transactions on Power Systems**, v. 30, n. 6, p. 3139–3149, nov. 2015.

XIAOMING, C. et al. **Flexible Distribution System Reconfiguration Using Graph Theory and Topology Identification Technology**. 2018 International Conference on Power System Technology (POWERCON). **Anais...IEEE**, nov. 2018Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8602307/>>

YIP, T. et al. Fast self-healing control of faults in MV networks using distributed intelligence. **CIREN - Open Access Proceedings Journal**, v. 2017, n. 1, p. 1131–1133, 1 out. 2017.

ZANETTA JR., L. C. **Fundamentos de Sistemas Elétricos de Potência**. 1. ed. São Paulo, SP: [s.n.].

ANEXO A: VALORES UNITÁRIOS DE RESISTÊNCIA E REATÂNCIA DOS CONDUTORES

Tabela 0.1 – Valores unitários de resistência e reatância dos condutores usualmente utilizados em redes de distribuição.

Condutor	R ₁	X ₁	R ₀	X ₀	Capacidade (A)
2#F3,09CAZ	31,0490	1,1640	31,0190	1,5890	6
3#1/0CA	0,6047	0,4483	0,7825	1,9115	203
3#1/0CAA	0,6908	0,5183	0,8686	1,9815	220
3#1/0CC	0,3773	0,4499	0,5550	1,9131	305
3#1CA	0,6047	0,4483	0,7825	1,9115	203
3#1CAA	0,6908	0,5183	0,8686	1,9815	220
3#1CC	0,3773	0,4499	0,5550	1,9131	305
3#2/0CA	0,4792	0,4410	0,6569	1,9042	235
3#2/0CAA	0,5563	0,5090	0,7340	1,9722	250
3#2CA	0,9633	0,4673	1,1411	1,9305	152
3#2CAA	1,0503	0,5239	1,2281	1,9871	160
3#2CC	0,5991	0,4717	0,7769	1,9349	226
3#3/0CA	0,3810	0,4323	0,5587	1,8955	271
3#3/0CAA	0,4494	0,4965	0,6271	1,9597	290
3#3/0CC	0,2374	0,4325	0,4152	1,8957	412
3#336,4	0,1908	0,4007	0,3686	1,8640	419
3#336,4CA	0,1908	0,4007	0,3686	1,8640	419
3#336,4CAA	0,1902	0,3871	0,3679	1,8503	428
3#336,4CC	0,1908	0,4007	0,3686	1,8640	419
3#397,5CAA	0,1902	0,3871	0,3679	1,8503	428
3#3CAA	0,4494	0,4965	0,6271	1,9597	290
3#4/0CA	0,3021	0,4236	0,4798	1,8868	314
3#4/0CAA	0,3679	0,4717	0,5457	1,9349	330
3#4/0CC	0,1883	0,4232	0,3661	1,8864	477
3#4/0SUCA	0,3472	0,1367	2,4440	0,0730	537
3#477CA	0,1342	0,3888	0,3120	1,8520	519
3#477CAA	0,1342	0,3778	0,3120	1,8410	523
3#4CA	1,5289	0,4960	1,7066	1,9592	114
3#4CAA	1,5973	0,5201	1,7750	1,9833	125
3#4CC	0,9434	0,4891	1,1212	1,9523	163
3#6CA	2,4301	0,5022	2,6078	1,9538	80
3#6CAA	2,4736	0,5288	2,6513	1,9921	80
3#6CC	1,4978	0,5065	1,6756	1,9697	121
3#7CC	2,3617	0,5239	2,5395	1,9871	72
3#8CC	2,3617	0,5239	2,5395	1,9871	72
3#C11,9CAA	31,0490	1,1640	31,0190	1,5890	6
3#C11,9CAZ	31,0490	1,1640	31,0190	1,5890	6
3#F3,09CAZ	31,0490	1,1640	31,0190	1,5890	6

ANEXO B: ALGORITMO PARA IMPLEMENTAR A MÁQUINA SÍNCRONA, O REGULADOR DE TENSÃO E O REGULADOR DE VELOCIDADE NO ATPDRAW

A – Algoritmo para implementar a máquina síncrona no ATPDraw

```

KARD  3  3  3  3  4  5  7  7  7  7  7  7  9  9  9  9  9  9  9  9 10 10 10
10 10
      10 11 11 11 11 19 20 21
KARG  1  5  6  7  1  1  8  9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24
25 26
      27 28 29 30 31  2  3  4
KBEG  3 11 21 31  3  3  8 11 21 31 41 51  1 11 21 31 41 51 61 71  1 11 21
31 41
      71 11 21 31 41  3  3  3
KEND  7 20 30 40  7  7 10 20 30 40 50 60 10 20 30 40 50 60 70 80 10 20 30
40 50
      80 20 30 40 50  8  8  8
KTEX  1  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  1  1  1
$ERASE
C      1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
C -----DADOS ELETRICOS DA MAQUINA SINCRONA-----
/SOURCE
59BARRAA  VOLTTB____FREQUE____ANGULO____
  BARRAB
  BARRAC
C -----DADOS DA MAQUINA SINCRONA-----
C      1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
PARAMETER FITTING
1 1 1NP_SMOVTP____SMOVTQ____POTMVA____TENNKV____AGLINE____
BLANK
C      1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
RESTARRAARXL____XD____XQ____XDD____XQQ____XDDD____XQQQ____
____
TDOP____TQOP____TDOPP____TQOPP____XO____
XCAN____
C -----DADOS MECANICOS DA MAQUINA SINCRONA-----
1      EXTRS____HICO____DSR____DSM____
BLANK
C -----SAIDAS DESEJADAS-----
11
21

```

```

31
41
51
BLANK
72POTMEC      1
74SPEED1      2
71VFREGT
  FINISH
$EOF  User-supplied header cards follow.
ARG,BARRA,POTMEC,SPEED1,VFREGT
ARG,VOLTTB____,FREQUE____,ANGULO____,NP____
ARG,SMOVTP____,SMOVTQ____,POTMVA____,TENNKV____
ARG,AGLINE____,RESTARRAAR,XL____,XD____,XQ____
ARG,XDD____,XQQ____,XDDD____,XQQQ____,TDOP____
ARG,TQOP____,TDOPP____,TQOPP____,XO____,XCAN____
ARG,EXTRS____,HICO____,DSR____,DSM____
NUM,VOLTTB____,FREQUE____,ANGULO____,NP____
NUM,SMOVTP____,SMOVTQ____,POTMVA____,TENNKV____
NUM,AGLINE____,RESTARRAAR,XL____,XD____,XQ____
NUM,XDD____,XQQ____,XDDD____,XQQQ____,TDOP____
NUM,TQOP____,TDOPP____,TQOPP____,XO____,XCAN____
NUM,EXTRS____,HICO____,DSR____,DSM____

```

B – Algoritmo para implementar o regulador de tensão IEEE do tipo I no ATPDraw

```

KARD  3  4  5  6  7  8  9  9  9 10 10 10 11 12 12 12 13 13 13 14 15 15 15
16 16
      16 17 17 17 17 18 18 19 19 19 21 22 22 22 22 22 23 23 23 23 23 24 25
26 26
      26 27 27 27 27 29 29 30 30 30 31 32 33 34 35 36 37 38
KARG  4 -7 -9-10-12  1  1  5 -1  6 -1 -2  2  2  5 -3  6 -3 -4  3  3  5 -5
6 -5
      -6 -2 -4 -6 -7  9 -8  7 -7 -9  8 10 -8 -9-10-11 11 12 13-10-12 14 15
16-12
      -13  4 17 18 19-13 20 21  4 22-11 23 24  4 -7 -2 -8  1 -1
KBEG  3  3  3  3  3  3 12 51  3 19 12  3  3 12 51  3 19 12  3  3 12 51  3
19 12
      3 13 20 27  3 12  3 51 28  3 11 51 20 12  3 28 51 57 63 12  3 11 11
51 12
      3  3 51 57 63 12  1 11 12 51  3 11 11  3  3  3  3  3  3
KEND  8  8  8  8  8  8 17 56  8 24 17  8  8 17 56  8 24 17  8  8 17 56  8
24 17
      8 18 25 32  8 17  8 56 33  8 20 56 25 17  8 33 56 62 68 17  8 20 20
56 17
      8  8 56 62 68 17 10 20 17 56  8 20 20  8  8  8  8  8  8
KTEX  1  1  1  1  1  1  1  0  1  0  1  1  1  1  0  1  0  1  1  1  0  1
0  1
      1  1  1  1  1  0  1  0  1  1  0  0  1  1  1  1  0  0  0  1  1  0  0
0  1
      1  1  0  0  0  1  0  0  1  0  1  0  0  1  1  1  1  1  1  1
$ERASE
/TACS
77VFREGT  1.
77INPUTT  1.
77SAIDA1  1.
77SAIDA2  0
77SAIDA3  1

```



```

90BARRTA
98INPUTA66+BARRTA                                FREQUE
98INPUT2  =INPUTA/TENNOM
90BARRTB
98INPUTB66+BARRTB                                FREQUE
98INPUT3  =INPUTB/TENNOM
90BARRTC
98INPUTC66+BARRTC                                FREQUE
98INPUT4  =INPUTC/TENNOM
98INPUTT  =(INPUT2+INPUT3+INPUT4)/3
98TENZA_  =TENREF
C          1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
1SAIDA1                                +INPUTT                                GANHOI
1.
1. TR_____
C          1          2          3          4          5          6          7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
0SAIDA2  -SAIDA1 +TENZA_ -SAIDA6                                GANHOJ
1SAIDA3  +SAIDA2                                KA_____LMVMINLMVMAX
1. TB_____
1. TA_____
0SAIDA4  +SAIDA3                                GANHOK
1VFREGT  +SAIDA4                                GANHOLLMEMINLMEMAX
1.
KE_____TE_____
1SAIDA6  +VFREGT                                GANHOM
KF_____
1. TF_____
33VFREGT
33INPUTT
33INPUT2
33TENZA_
33BARRTA
33INPUTA
$EOF User-supplied header cards follow.
ARG,BARRTA,BARRTB,BARRTC,VFREGT,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
ARG,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
ARG,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
ARG,GANHOM,KF_____,TF_____
NUM,FREQUE,TENNOM,GANHOI,TR_____
NUM,TENREF,GANHOJ,KA_____,LMVMIN,LMVMAX,TB_____,TA_____
NUM,GANHOK,GANHOL,LMEMIN,LMEMAX,KE_____,TE_____
NUM,GANHOM,KF_____,TF_____
DUM,INPUTA,INPUT2,INPUTB,INPUT3,INPUTC,INPUT4,INPUTT
DUM,TENZA_,SAIDA1,SAIDA2,SAIDA6,SAIDA3,SAIDA4

```

C – Algoritmo para implementar o regulador de velocidade no ATPDraw

```

KARD  3  4  5  5  5  6  6  7  8  8  8  8  9  9  9 10 10 11 12 12 12 13 14
15 15
      15 16 17 18 18 18 18 19 19 19 19 19 20 20 21 21 21 22 23 24 24 24 25
26 27

```

```

      28 29
KARG  1  2  3  4 -1 16 -2  1  1  5 -1 -3  6 -3 -4  7  8  9 10 -4 -5 11 12
13 -5
      -6 14 15 17 -2 -6 -7 18 19 20 -7 -8 -8 -9  2 21 -9 22 23  1  4-10  2
1 -1
      -2-10
KBEG  3  3 18 26  3 12  3  3 20 51 12  3 51 12  3  1 51 11 51 12  3  1 11
51 12
      3 11 11 51 20 12  3 51 57 63 12  3 12  3  3 51 12 11 11 13 23  3  3
3  3
      3  3
KEND  8  8 23 28  8 17  8  8 25 56 17  8 56 17  8 10 56 20 56 17  8 10 20
56 17
      8 20 20 56 25 17  8 56 62 68 17  8 17  8  8 56 17 20 20 18 25  8  8
8  8
      8  8
KTEX  1  1  0  0  1  0  1  1  1  0  1  1  0  1  1  0  0  0  0  1  1  0  0
0  1
      1  0  0  0  1  1  1  0  0  0  1  1  1  1  1  0  1  0  0  1  0  1  1
1  1
      1  1
$ERASE
/TACS
77SPEED1  188.5
77POTMEC  1.
98REFERE  =( (120*FREQUE) /NP_) * (2*PI/60)
98POTENC  =POTREF
92SPEED1
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
0INREGV  +REFERE  -SPEED1      GANHOA
1PBREGV  +INREGV      GANHOB
PARA_ATROA      GANHOC
      1. TFB_____
1CIREGV  +PBREGV      GANHOD
PARA_BTROB
      1. TUM_____
1CIIRGV  +CIREGV      GANHOE
      1. TDOIS_____
      1. TTRES_____
C      1      2      3      4      5      6      7
8
C
34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567
890
0CIIIRV  +CIIRGV +POTENC      GANHOF
0CIVRGV  +CIIIRV      GANHOGLMPMINLMPMAX
98TESTEE  =CIVRGV*1
1POTMEC  +TESTEE      GANHOH
      1. TQUATRO____
      1. TCINCO_____
98FREQHZ  =(SPEED1*60*NP_) / (2*PI*120)
33POTMEC
33SPEED1
33REFERE
33POTENC
33FREQHZ
$EOF  User-supplied header cards follow.

```

```

ARG, SPEED1, POTMEC, FREQUE, NP_
ARG, GANHOA, GANHOB, PARA_ATROA, GANHOC, TFB_____, GANHOD
ARG, PARA_BTROB, TUM_____, GANHOE, TDOIS_____, TTRES_____, POTREF, GANHOF
ARG, GANHOG, LMPMIN, LMPMAX, GANHOH, TQUATRO_____, TCINCO_____
NUM, FREQUE, NP_, GANHOA, GANHOB, PARA_ATROA
NUM, GANHOC, TFB_____, GANHOD, PARA_BTROB, TUM_____
NUM, GANHOE, TDOIS_____, TTRES_____, POTREF, GANHOF
NUM, GANHOG, LMPMIN, LMPMAX, GANHOH, TQUATRO_____, TCINCO_____
DUM, REFERE, POTENC, INREGV, PBREGV, CIREGV, CIIRGV, CIIIRV, CIVRGV, TESTEE, FREQHZ

```


ANEXO C: DADOS DA MÁQUINA SÍNCRONA, DO REGULADOR DE TENSÃO E DO REGULADOR DE VELOCIDADE

Tabela 0.1 – Parâmetros do gerador síncrono.

Variável	Descrição	Valor
$S_{GD,n}$	Potência aparente nominal (MVA)	5,0
V_n	Tensão nominal (kV)	6,6
R_A	Resistência de armadura (p.u.)	0,004
x_L	Reatância de dispersão da armadura (p.u.)	0,1
x_d	Reatância de eixo direto (p.u.)	1,8
x_q	Reatância de eixo de quadratura (p.u.)	1,793
x'_d	Reatância transitória de eixo direto (p.u.)	0,166
x'_q	Reatância transitória de eixo de quadratura (p.u.)	0,98
x''_d	Reatância subtransitória de eixo direto (p.u.)	0,119
x''_q	Reatância subtransitória de eixo de quadratura (p.u.)	0,17
x_0	Reatância de sequência zero (p.u.)	0,046
T'_{d0}	Constante de tempo de circuito aberto, transitório de eixo direto (s)	1,754
T'_{q0}	Constante de tempo de circuito aberto, transitória de eixo de quadratura (s)	0,0
T''_{d0}	Constante de tempo de circuito aberto, subtransitória de eixo direto (s)	0,019
T''_{q0}	Constante de tempo de circuito aberto, subtransitória de eixo de quadratura (s)	0,164
H	Constante de inércia (s)	2,0
P	Número de polos (polos)	4
f	Frequência (Hz)	60
ω_s	Velocidade síncrona (rad/s)	188,5

Fonte: (MOURA, 2011, p. 227).

Tabela 0.2 – Parâmetros do regulador de tensão IEEE Tipo I.

Variável	Descrição	Valor
V_{ref}	Tensão de referência (p.u.)	1,0
K_a	Ganho do regulador	100
K_f	Ganho de tempo do circuito estabilizante do regulador	0,03
K_e	Constante de excitação relacionada com a auto excitação do campo	1,0
T_a	Constante de tempo amplificada do regulador (s)	0,02
T_f	Constante de tempo do circuito estabilizador do regulador (s)	1,0
T_r	Constante de tempo do filtro de entrada do regulador (s)	0,001
T_e	Constante de tempo da excitatriz (s)	0,8
V_{max}	Limite máximo da tensão de saída do regulador (p.u.)	1,6
V_{min}	Limite mínimo da tensão de saída do regulador (p.u.)	0,8
E_{max}	Máxima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao acampo do gerador) (p.u.)	1,5
E_{min}	Mínima tensão de saída da excitatriz (aplicada ao campo do gerador) (p.u.)	0,0

Fonte: (MOURA, 2011, p. 228 - 229).

Tabela 0.3 – Parâmetros do regulador de velocidade.

Variável	Descrição	Valor
G_{fb}	Ganho do <i>Flyball</i> (p.u.)	1,0
R	Regulação (p.u.)	0,05
T_{fb}	Constante de tempo do <i>Flyball</i> (s)	0,2
T_1	Constante de tempo 1 do sistema de controle (s)	0,0
T_2	Constante de tempo 2 do sistema de controle (s)	0,0
T_3	Constante de tempo 3 do sistema de controle (s)	0,3
T_4	Constante de tempo 4 da turbina hidráulica (s)	0,0
T_5	Constante de tempo 5 da turbina térmica/hidráulica (s)	0,3
P_{ref}	Potência mecânica de referência	1,0
P_{max}	Potência mecânica máxima da turbina (p.u.)	1,2

Fonte: (MOURA, 2011, p. 231).