

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Tese de Doutorado

Aprimoramento de Técnicas de Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão com Compensação Série

Daphne De La Torre Barros

Campina Grande - Paraíba - Brasil

© Daphne De La Torre Barros, Julho de 2018

Daphne De La Torre Barros

Aprimoramento de Técnicas de Chaveamento Controlado de Linhas de Transmissão com Compensação Série

Tese apresentada à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências do Programa de Doutorado em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Energia

Washington Luiz Araújo Neves, Ph.D.

Orientador

Karcus Marcelus Colaço Dantas, D.Sc.

Orientador

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Julho de 2018

B277a Barros, Daphne De La Torre.
Aprimoramento de técnicas de chaveamento controlado de linhas de transmissão com compensação série / Daphne De La Torre Barros. – Campina Grande, 2018.
104 f.: il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Washington Luiz Araújo Neves; Coorientação: Prof. Dr. Karcus Marcelus Colaço Dantas."

Referências.

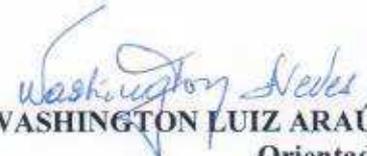
1. Chaveamento Controlado. 2. Carga Residual. 3. Compensação Série. 4. Linhas de Transmissão. 5. Sobretensões Transitórias de Manobra. I. Neves, Washington Luiz Araújo. II. Dantas, Karcus Marcelus Colaço. III. Título.

CDU 621.3.062(043)

**"APRIMORAMENTO DE TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO CONTROLADO DE LINHAS
DE TRANSMISSÃO COM COMPENSAÇÃO SÉRIE "**

DAPHNE DE LA TORRE BARROS

TESE APROVADA EM 02/10/2018

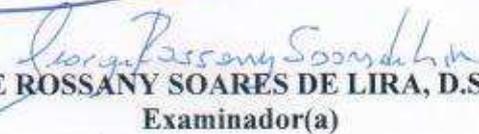

WASHINGTON LUIZ ARAÚJO NEVES, Ph.D., UFCG
Orientador(a)


KARCIUS MARCELUS COLAÇO DANTAS, D.Sc., UFCG
Orientador(a)

JOSÉ CARLOS DE OLIVEIRA, Ph.D., UFU
Examinador(a)


ANTONIO CARLOS SIQUEIRA DE LIMA, D.Sc., UFRJ
Examinador(a)


DAMÁSIO FERNANDES JUNIOR, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


GEORGE ROSSANY SOARES DE LIRA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)


BENEMAR ALENCAR DE SOUZA, D.Sc., UFCG
Examinador(a)

CAMPINA GRANDE - PB

*Aos meus pais, Flávio e Francisca, e aos meus irmãos,
Kevin e Brenda, DEDICO.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos e oportunidades concedidas para que eu pudesse me desenvolver como pessoa e profissional ao longo do doutorado, sentindo profunda gratidão pela permissão de concluir uma missão tão importante da minha vida.

Ao professor Washington pela amizade e orientação deste trabalho baseada na compreensão, motivação e confiança em mim, contribuindo significativamente para o meu desenvolvimento ao longo do doutorado, além de todos os aprendizados, conselhos e experiências compartilhados comigo que me inspiram a ser uma pessoa melhor.

Ao professor Karcius pela orientação desta tese com muita paciência e contribuições fundamentais para o desenvolvimento e enriquecimento do trabalho.

Aos professores Damásio, George, Benemar, Antonio Carlos e José Carlos pelas valiosas contribuições para o enriquecimento do trabalho.

Aos meus pais Flávio e Francisca, que são fontes inesgotáveis de amor, paciência, compreensão e confiança, e que estão ao meu lado, me oferecendo todo e qualquer amparo nos momentos mais difíceis da minha vida.

Aos meus irmãos Kevin e Brenda por toda a confiança depositada em mim, pela paciência e amor, trazendo sempre mais leveza e felicidade para todos os momentos da minha vida.

Aos meus irmãos Ariadne, Lígia e Derek pelo exemplo, incentivo e confiança depositada em mim ao longo da minha vida.

Ao meu tio Renato pela confiança e por todo o apoio dado desde a época da graduação, facilitando a minha formação profissional em Campina Grande.

Às minhas amigas Érica, Jamile, Jeane, Renata, Stefânia e Yonatha pela amizade, pelo amor e apoio incondicional durante todo o doutorado, sendo meu porto seguro em Campina Grande, transformando momentos desafiadores e desestimulantes ao longo desse processo em boas risadas, num ambiente de trabalho leve, com muita união e cumplicidade.

Aos meus amigos Murilo e Tainá pela amizade e por todo o apoio espiritual, mental e físico com muito amor e paciência que foram fundamentais para eu insistir e acreditar na minha capacidade de realização durante momentos difíceis do doutorado.

Ao meu amigo Felipe Lopes pela amizade, inspiração e por resgatar o meu entusiasmo e motivação em momentos cruciais do doutorado, oferecendo uma ajuda inestimável.

Ao meu amigo José Maurício pela amizade, pelo apoio e por todo o tempo dedicado a me ajudar e me motivar com tanta paciência.

Aos meus amigos Renato, Fabio, Isabela, Talita, Luana, Wendell pela motivação, apoio e confiança.

Aos meus amigos da UFCG, Raphael, Cecília, Edson, Ana Vitória, Alana, Huilman, Ericson, Célio, Eubis, Wellinsilvio e todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a conclusão dessa etapa.

A todos os meus professores ao longo da vida pela valiosa contribuição na minha formação que me permitiram chegar até aqui.

Aos amigos do IFPE, em especial a Carlos Sivini (*in memoriam*) Jairson, Gilson e Gideão, por todo o apoio e confiança durante esse período que me permitiu conciliar as atividades do doutorado com as aulas no IFPE.

Aos meus queridos alunos por me inspirarem e tornarem meus dias mais leves e alegres, sempre me estimulando a buscar o meu aperfeiçoamento como pessoa e profissional.

A Niko por todo o amor, paciência e compreensão, me apoiando em todos os momentos, mesmo estando longe.

Aos funcionários da COPELE, em especial a Ângela e Pedro, por todo o apoio, paciência e diligência durante toda a pós-graduação.

Ao CNPq pelo suporte financeiro desta pesquisa.

E a todas as pessoas que estão ou passaram por minha vida neste período, pois cada uma contribuiu de alguma maneira para que eu pudesse finalizar uma etapa tão importante para o meu crescimento pessoal e profissional.

RESUMO

Nesta tese, o objetivo principal é o aprimoramento de técnicas de chaveamento controlado para linhas de transmissão com compensação série a partir da avaliação das diversas condições de operação do banco de capacitores série (BCS) durante manobras de religamento tripolar de linhas de transmissão, destacando os desafios e as potencialidades de tal aplicação. Um avanço em relação à literatura atual é apresentado neste trabalho, em que as principais configurações de compensação série são avaliadas a fim de abordar o impacto das condições de operação dos BCS na carga residual da linha. Para isto, simulações digitais com um sistema elétrico de 500 kV são realizadas no *Alternative Transients Program* (ATP). Verifica-se que algumas técnicas existentes de chaveamento controlado desenvolvidas para linhas não compensadas e com compensação em derivação podem ser aplicadas em linhas com compensação série. Além disso, um novo método para linhas apenas com compensação série é proposto neste trabalho. O método se baseia na estimação da carga residual da linha a partir do uso de um filtro digital recursivo para a correção da tensão secundária do transformador de potencial capacitivo (TPC). De acordo com os resultados apresentados, constata-se que é possível ter manobras controladas de linhas com compensação série, garantindo sobretensões menores que 2,0 pu.

Palavras-chave: Chaveamento controlado; carga residual; compensação série; linhas de transmissão; sobretensões transitórias de manobra.

ABSTRACT

The main objective of the present thesis is to improve controlled switching techniques for series compensation systems based on the evaluation of the several operating conditions of series capacitor banks (SCB) during transmission line reclosing operations, highlighting, at the same time, their challenges and potentialities of such an application. Here a step forward the current literature is presented and key situations are evaluated to address the impact of SCB operating conditions on line trapped charge. Digital simulations for a 500 kV power system are carried out using the Alternative Transients Program (ATP). It is shown that some of the existing techniques for uncompensated and shunt compensated lines can be used for series compensated lines as well. Moreover, a new method for purely series compensated lines is proposed in this present thesis. The method is based on the estimation of the line trapped charge using a recursive digital filter for the correction of the secondary voltage of the capacitive voltage transformer (CVT). It is then, possible to mitigate switching transient overvoltages by applying controlled switching techniques, ensuring magnitudes less than 2.0 pu.

Keywords: Controlled switching; trapped charge; transmission lines; switching transient overvoltages.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xx
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Relevância da Tese	2
1.2 Objetivos e Contribuições	4
1.3 Organização do Texto	5
Capítulo 2 – Fundamentação Teórica	7
2.1 Sobretensões de Manobra	7
2.1.1 Manobra de Energização	8
2.1.2 Manobra de Religamento	9
2.2 Princípios do Chaveamento Controlado	12
2.2.1 Estratégia para Manobra de Energização	13
2.2.2 Estratégia para Manobra de Religamento	14
2.3 Compensação Série	16
2.3.1 Banco de Capacitores Série	18
2.3.2 Dimensionamento de Bancos de Capacitores Série	19
2.3.3 Local de Instalação de Bancos de Capacitores Série	20

Capítulo 3 – Revisão Bibliográfica	23
3.1 Métodos de Chaveamento Controlado	23
3.2 Síntese da Revisão Bibliográfica	29
Capítulo 4 – Análise da Carga Residual em Linhas com Compensação Série	31
4.1 Sistema Elétrico Utilizado	34
4.2 Abertura trifásica da linha sem defeito	36
4.2.1 Caso 1.1: Linhas apenas com compensação série	36
4.2.2 Caso 1.2: Linhas com compensação série e shunt	39
4.3 Abertura trifásica da linha com defeito	41
4.3.1 Casos 2.1: Linhas apenas com compensação série	41
4.3.2 Casos 2.2: Linhas com compensação série e shunt	48
4.4 Impacto da reinserção do BCS antes da manobra de religamento	55
4.5 Síntese do Capítulo	59
Capítulo 5 – Método de Chaveamento Controlado Utilizado para Linhas com Compensação Série	61
5.1 Técnicas de Chaveamento Controlado Utilizadas	63
5.1.1 Filtragem e Amostragem	64
5.1.2 Detecção de Zeros ou Polaridades	65
5.1.3 Estimação dos Sinais	65
5.1.4 Cálculo dos Instantes Ótimos para Linhas sem Compensação Reativa: Método Proposto	67
5.1.5 Cálculo dos Instantes Ótimos - Linhas com Compensação em Derivação .	69
5.1.6 Lógica do Controlador	70
5.2 Suportabilidade Dielétrica dos Disjuntores em Manobras Controladas	71

5.3	Estimação da Carga Residual em Linhas apenas com Compensação Série	74
5.4	Síntese do Capítulo	78
Capítulo 6 – Avaliação do Chaveamento Controlado de Linhas com Compensação Série		80
6.1	Avaliação do Chaveamento Controlado em Linhas apenas com Compensação Série	80
6.2	Avaliação do Chaveamento Controlado em Linhas com Compensação Série e em Derivação	88
6.3	Avaliação do Impacto da Reinserção do BCS antes da Manobra de Religamento	94
6.4	Síntese do Capítulo	95
Capítulo 7 – Conclusões		97
Referências Bibliográficas		100

LISTA DE FIGURAS

2.1	Sobretensão típica de uma manobra de energização.	9
2.2	Sinal de tensão no terminal receptor de uma linha sem compensação reativa em uma manobra de religamento trifásico realizada no mesmo instante nas três fases.	11
2.3	Sinal tensão no terminal receptor de uma linha com compensação reativa (30%) em uma manobra de religamento trifásico realizada no mesmo instante nas três fases.	11
2.4	Esquema de uma manobra controlada.	13
2.5	Sinal de referência para uma manobra de energização de linha de transmissão.	14
2.6	Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão sem compensação reativa: (a) carga residual com polaridade positiva (b) carga residual com polaridade negativa.	15
2.7	Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão com grau de compensação reativa de 30%.	16
2.8	Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão com grau de compensação reativa de 70%.	16
2.9	Arranjo típico de um banco de capacitores série.	18
2.10	Ilustração da definição de falta interna e externa em linhas com compensação série.	19
2.11	Principais arranjos de linhas com compensação reativa série.	22
4.1	Condições de operação do BCS em função da causa de abertura da linha de transmissão com compensação série.	32
4.2	Esquema do sistema elétrico modelado no ATP.	34

-
- 4.3 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultantes de uma abertura trifásica sem ocorrência de defeito para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e linha não compensada: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 37
- 4.4 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 38
- 4.5 Sinais de tensão sobre o disjuntor vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 39
- 4.6 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica sem ocorrência de defeito para linhas com compensação reativa série e em derivação (arranjos IV, V e VI) e linha apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C. 40
- 4.7 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-terra (caso 2.1.1) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 42
- 4.8 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I com a ocorrência de uma falta fase-terra (caso 2.1.1): (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 43
- 4.9 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.1: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 44
- 4.10 Sinais de tensão sobre o disjuntor vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.1: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 44
- 4.11 Sinais de tensão do lado da linha no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.1.2) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 45
- 4.12 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.2: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 46

- 4.13 Sinais de tensão do lado da linha no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra (caso 2.1.3) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 47
- 4.14 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.1.4) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 48
- 4.15 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito monofásico (caso 2.2.1) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase A. 49
- 4.16 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para uma abertura trifásica com ocorrência de defeito monofásico (caso 2.2.1) para o arranjo VI: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 50
- 4.17 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C. 51
- 4.18 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra (caso 2.2.3) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C. 52
- 4.19 Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto após abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra na fase C do arranjo VI. 52
- 4.20 Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C. 53

4.21	Sinal de tensão do lado da linha visto no terminal local após abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase na fase B, com destaque para os arranjos IV e V.	54
4.22	Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultantes da abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para a fase B: (a) arranjo IV; (b) arranjo V.	54
4.23	Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultantes da abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para a fase B: (a) arranjo IV; (b) arranjo V.	54
4.24	Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.2.4) para o arranjo II com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	56
4.25	Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.1.4) para o arranjo II com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	57
4.26	Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para a abertura de linha devido a uma falta bifásica (caso 2.2.2) para o arranjo VI, considerando a reinserção do BCS após a extinção da falta.	58
4.27	Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para o esquema VI com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	58
4.28	Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para o arranjo VI com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	59
5.1	Fluxograma da técnica de chaveamento controlado utilizada neste trabalho. . . .	64

5.2	Estimação do sinal de referência.	66
5.3	Instantes adequados para o religamento em linhas apenas com compensação série quando a carga residual é menor que 1,0 pu: (a) polaridade positiva; (b) polaridade negativa.	69
5.4	Determinação dos instantes ótimos em uma manobra de religamento de linha com compensação reativa em derivação.	70
5.5	Curva da suportabilidade dielétrica representada por uma reta associada à dispersão mecânica.	72
5.6	Representação da suportabilidade dielétrica com TDS linear no ATP.	73
5.7	Ajuste do instante ótimo para minimizar a máxima tensão de pré-arco.	73
5.8	Modelo de TPC de 500 kV (PAJUELO <i>et al.</i> , 2008).	75
5.9	Resposta em frequência do modelo de TPC de (PAJUELO <i>et al.</i> , 2008).	76
5.10	Sinais de tensão do lado da linha vistos na entrada (primário) e saída (secundário) do TPC em uma linha apenas com compensação série, cuja abertura foi causada por uma falta CA: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	76
5.11	Sinais de tensão do lado da linha resultantes do uso do filtro compensador na saída do TPC: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.	78
6.1	Perfil das sobretensões ao longo da linha para os arranjos apenas com compensação série para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta: (a) arranjo I; (b) arranjo II.	81
6.2	Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra BT a 100 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.	83
6.3	Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA a 100 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.	84

- 6.4 Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II. 85
- 6.5 Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II. 86
- 6.6 Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta: (a) fase-terra BT a 100 km do terminal local; (b) fase-fase CA a 100 km do terminal local; (c) fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local; (d) trifásica ABCT a 300 km do terminal local. 87
- 6.7 Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta para os arranjos IV, V e VI. 88
- 6.8 Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra AT: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI. 89
- 6.9 Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI. 90
- 6.10 Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra BCT: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI. 91
- 6.11 Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase AB: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI. 93

-
- 6.12 Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série para o arranjo II para uma abertura trifásica devido a uma falta trifásica ABCT, considerando a reinserção do BCS antes da manobra de religamento. 94
- 6.13 Perfil das sobretensões ao longo da linha para o arranjo VI para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA, considerando a reinserção do BCS antes da manobra de religamento. 95

LISTA DE TABELAS

3.1	Síntese da revisão bibliográfica referente a chaveamento controlado de linhas de transmissão.	30
4.1	Módulo e fase das fontes de tensão (base 550 kV)	34
4.2	Impedâncias das fontes	34
4.3	Dados de sequência da linha de transmissão.	35
4.4	Característica dos para-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV.	35
4.5	Curva $V_x I$ do MOV.	36
5.1	Coefficientes do compensador no domínio z para TPC de 500 kV.	77
6.1	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série para uma abertura trifásica sem defeito.	82
6.2	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-terra BT a 100 km do terminal local.	83
6.3	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-fase CA a 100 km do terminal local.	84
6.4	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local.	85
6.5	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local.	86

6.6	Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta.	87
6.7	Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta.	89
6.8	Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra AT a 100 km do terminal local.	90
6.9	Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA a 100 km do terminal local.	91
6.10	Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra BCT a 300 km do terminal local.	92
6.11	Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase AB a 300 km do terminal local.	93

INTRODUÇÃO

A qualidade do fornecimento de energia elétrica é uma preocupação do setor elétrico, visto que é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico dos países. De acordo com os estudos de demanda de carga para o período de 2018-2022, é previsto um crescimento de carga no Sistema Interligado Nacional (SIN) de 3,9% ao ano (EPE *et al.*, 2018). Portanto, para que o sistema atenda ao crescimento de demanda, garantindo a disponibilidade, confiabilidade e conformidade da energia elétrica fornecida, investimentos na expansão e modernização do SIN são necessários.

Segundo dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), o sistema de transmissão, incluindo linhas de 230 a 750 kV, já corresponde a mais de 130.000 km de comprimento, e é responsável por transportar mais de 150.000 MW. Logo, devido à extensão do SIN, é imprescindível a aplicação de técnicas que visem à redução das perdas nas linhas de transmissão e manutenção dos níveis de tensão a fim de garantir a estabilidade do sistema. A compensação série é uma solução bastante atrativa para esta finalidade. Além de melhorar a estabilidade do sistema, tanto em regime permanente quanto transitório, aumenta a capacidade de transmissão das linhas, o que permite, muitas vezes, postergar investimentos na construção de novas linhas de transmissão, além de proporcionar outros benefícios. De acordo com o ONS, mais de 70 linhas do SIN já estão operando com bancos de capacitores série (BCS).

Para as linhas em extra-alta tensão (EAT) e ultra-alta tensão (UAT), as sobretensões transitórias de manobra são determinantes para a definição do nível de isolamento dos equipamentos elétricos (D'AJUZ *et al.*, 1987), que por sua vez, tem impacto direto nos custos do sistema (IEEE Working Group on Switching Surges, 1982; IBRAHIM; DOMMEL, 2005). Como são originadas a partir de alterações topológicas na rede, como energização de transformadores e religamento de linhas de transmissão, ou ainda variações bruscas no sistema, como um curto-circuito, não é possível evitá-las completamente. Portanto, técnicas que visem à redução da

amplitude dessas sobretensões são de grande interesse para o setor elétrico, pois possibilitam a realização de um projeto econômico tanto em relação às linhas de transmissão quanto aos equipamentos de subestação, além de melhorar a qualidade da energia e aumentar a confiabilidade do sistema.

O método tradicionalmente empregado para a redução das sobretensões de manobra se baseia no uso de resistores de pré-inserção (RPI), instalados na câmara dos disjuntores. Apesar de ser bastante eficiente, disjuntores com RPI apresentam maior taxa de falha, o que eleva os custos de manutenção e reduz a confiabilidade do sistema (CIGRE Working Group A3.07, 2004b; ABB, 2013). Outra técnica aplicada consiste no uso de para-raios, que podem ser instalados ao longo da linha (LEGATE *et al.*, 1988; RIBEIRO; MCCALLUM, 1989; BUNOV *et al.*, 2014). No entanto, não apresenta a mesma eficiência que o uso de RPI. Atualmente, as técnicas de chaveamento controlado têm se destacado para essa finalidade (FROEHLICH *et al.*, 1997a; WALLNER; RICHTER, 2006; MESTAS *et al.*, 2011a; DANTAS *et al.*, 2014). Neste trabalho, apresenta-se a avaliação de técnicas de chaveamento controlado para o religamento automático de linhas de transmissão com compensação série.

1.1 RELEVÂNCIA DA TESE

Chaveamento controlado se refere ao uso de técnicas para controlar a abertura ou fechamento de disjuntores a partir do monitoramento de sinais elétricos de referência, seja tensão ou corrente (CIGRE Working Group 13.07, 1999). A idealização do chaveamento controlado é da década de 1960 (COLCLASER *et al.*, 1969), no entanto, a sua aplicação só se tornou possível em meados dos anos 1990 com o avanço tecnológico na área de relés digitais e microprocessadores (ITO, 2002).

O chaveamento controlado tem sido aplicado com sucesso em manobras de bancos de capacitores, reatores, transformadores e linhas de transmissão. Uma das principais concessionárias de energia elétrica do Canadá já fez a readequação (*retrofit*) de mais de 140 disjuntores para aplicar o chaveamento controlado (MERCIER *et al.*, 2014). Além de dispensar o uso de resistores de pré-inserção, o chaveamento controlado oferece uma série de vantagens, tanto para o equipamento manobrado quanto para o sistema elétrico (CIGRE Working Group A3.07, 2004b).

E além das aplicações convencionais, tem-se estudado aplicações para o sistema de distribuição, como a energização de parques eólicos a partir da rede de distribuição (MERCIER *et al.*, 2014).

Com o levantamento dos principais algoritmos para manobras de linhas de transmissão, verificou-se que a maioria se destina a linhas com compensação reativa em derivação (FROELICH *et al.*, 1997a; WALLNER; RICHTER, 2006; MESTAS *et al.*, 2011a; ATEFI; SANAYE-PASAND, 2013; DANTAS *et al.*, 2014), inclusive os algoritmos utilizados pelos principais fabricantes de dispositivos de chaveamento controlado (ABB, 2013; SIEMENS, 2011). No entanto, a compensação série tem sido bastante utilizada em linhas de transmissão como uma alternativa para aumentar a capacidade de transmissão de potência e melhorar a estabilidade do sistema como destacado anteriormente. Portanto, avaliar a viabilidade de aplicação do chaveamento controlado em linhas com BCS é de grande interesse para o setor elétrico.

A compensação série é feita a partir da instalação de BCS na linha, com o objetivo de reduzir a reatância série total da linha. Esses bancos são formados, basicamente, por unidades capacitivas e um sistema de proteção com disjuntor de desvio (*by-pass*), centelhador (*gap*), circuito de amortecimento e varistor de óxido metálico, comumente chamado de MOV do inglês (*Metallic Oxide Varistor*). Devido à presença desses elementos de proteção, o BCS pode ser retirado parcial ou completamente de operação durante uma perturbação na linha. Desta forma, quando há a abertura da linha, uma tensão residual permanece na mesma, conhecida como carga residual, e esta pode se distribuir ao longo da linha de forma não uniforme, diferentemente do que ocorre em linhas com compensação em derivação ou não compensadas (CIGRE Working Group A3.07, 2004a). Isto se deve à tensão sobre o capacitor série, o que pode comprometer a eficácia do chaveamento controlado na redução das sobretensões.

De acordo com o que foi apresentado, constata-se a importância de avaliar a viabilidade de aplicação do chaveamento controlado em linhas com compensação série, destacando os desafios e as potencialidades de tal aplicação para manobras de religamento trifásico automático, o que é de grande interesse para o setor elétrico. Esta tese está relacionada a trabalhos do Grupo de Sistemas Elétricos (GSE) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) inseridos na linha de pesquisa denominada Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência, inclusive em um projeto de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) intitulado *Redução de Sobretensões de Manobra em Linhas de Transmissão Utilizando Chaveamento Controlado*, executado no período

de 2014-2017 em parceria com a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF).

1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Nesta tese, o objetivo principal é aprimorar técnicas de chaveamento controlado para sistemas com compensação série a partir da avaliação das diversas condições de operação do banco de capacitores série durante manobras de religamento automático de linhas de transmissão. Os objetivos específicos são:

- Avaliar o impacto das principais configurações de linhas com compensação série no perfil de tensões ao longo da linha;
- Avaliar o impacto das condições de operação do banco de capacitores série no perfil de tensões ao longo da linha;
- Adaptar técnicas existentes de chaveamento controlado destinadas a linhas não compensadas e com compensação em derivação para aplicar em linhas com compensação série.

Desta forma, as contribuições desta pesquisa são:

- Apresentar as similaridades e particularidades da carga residual em linhas com compensação série em relação a linhas sem compensação e com compensação em derivação;
- Mostrar que técnicas existentes para linhas com compensação em derivação e não compensadas podem ser adaptadas para uso em linhas com compensação série;
- Propor um novo método de chaveamento controlado para linhas apenas com compensação série que se baseia na estimação do valor da carga residual a partir da correção da tensão secundária do transformador de potencial capacitivo (TPC).

As principais publicações relacionadas ao tema desta pesquisa são:

- BARROS, D. D. L. T.; DANTAS, K. M. C.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A. Avaliação da Influência da Suportabilidade Dielétrica do Disjuntor no Desempenho de um Método de Chaveamento Controlado Aplicado a Manobras de Linhas de Transmissão. *XIX Congresso Brasileiro de Automática - CBA*, 2012, Campina Grande - Paraíba.

- BARROS, D. D. L. T.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A.; DANTAS, K. M. C. Suportabilidade Dielétrica de Disjuntores em Manobras Controladas de Energização de Linhas de Transmissão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE*, 2014, Foz do Iguaçu - Paraná.
- BARROS, D. D. L. T.; DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D. Representação de Disjuntores em Manobras Controladas de Linhas de Transmissão. *XVI Encuentro Regional Iberoamericano de Cigré - ERIAC*, 2015, Puerto Iguazú - Argentina.
- BARROS, D. D. L. T.; NEVES, W. L. A.; DANTAS, K. M. C. ; FERNANDES Jr., D. Controlled Switching of Transmission Line with Series Compensation. *International Conference on Power Systems Transients - IPST*, 2015, Cavtat - Croatia.
- BARROS, D.; NEVES, W.; DANTAS, K. Controlled Switching of Series Compensated Transmission Lines: Challenges and Solutions. *IEEE PES Transactions on Power Delivery*, 2018 (submetido).

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta tese está organizada em 7 capítulos. Após este capítulo introdutório, tem-se a seguinte estrutura:

- No Capítulo 2, a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento desta pesquisa é apresentada, em que são abordados os principais aspectos referentes às sobretensões transitórias de manobra, chaveamento controlado de linhas de transmissão e compensação reativa série.
- No Capítulo 3, apresenta-se uma revisão bibliográfica referente aos principais algoritmos de chaveamento controlado para manobras de linhas de transmissão, além de destacar o que existe na literatura até o presente momento quanto à aplicação em linhas com compensação série.
- No Capítulo 4, uma análise da carga residual resultante em linhas com compensação série é apresentada a fim de identificar as principais características da carga residual para

diferentes arranjos de compensação série, considerando as condições variáveis de operação do BCS.

- No Capítulo 5, de acordo com os resultados apresentados no Capítulo 4, são apresentadas as técnicas de chaveamento controlado selecionadas para avaliar o desempenho quanto à redução das sobretensões em linhas com compensação série. Além disso, é proposto um novo método para linhas apenas com compensação série.
- No Capítulo 6, os resultados da avaliação do desempenho do chaveamento controlado em linhas com compensação série são apresentados.
- Por fim, no Capítulo 7, são apresentadas as conclusões da pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O chaveamento controlado de linhas de transmissão é uma das soluções que tem se destacado para a redução de sobretensões transitórias de manobra, as quais se originam de operações de energização e religamento automático. A maioria das técnicas aplicadas para essa finalidade são desenvolvidas para linhas sem compensação reativa ou com compensação em derivação. No entanto, há um grande número de linhas com compensação série, e com isso surge o interesse em avaliar a aplicabilidade do chaveamento controlado nestes casos, visto que a presença de bancos de capacitores série na linha traz algumas particularidades. Então, neste trabalho, o objetivo é avaliar a aplicação do chaveamento controlado em linhas com compensação série. Deste modo, os principais conceitos de sobretensões de manobra, chaveamento controlado e compensação série que fundamentam este trabalho de tese são apresentados neste capítulo.

2.1 SOBRETENSÕES DE MANOBRA

Em sistemas em EAT e UAT, as sobretensões de manobra são fenômenos transitórios determinantes para a definição do nível de isolamento dos equipamentos (D'AJUZ *et al.*, 1987), e são causadas por alterações topológicas na rede, como a energização de transformadores e religamento de linhas de transmissão, ou ainda por variações bruscas no sistema, como um curto-circuito.

Uma das principais características desse fenômeno transitório é seu caráter probabilístico durante manobras de fechamento. Como a sobretensão é resultado da ação de um disjuntor, para uma determinada manobra pode-se obter diferentes valores de sobretensão em função da dispersão mecânica dos contatos deste equipamento de manobra e do valor da tensão no instante em que ocorre a operação.

Em manobras de energização e religamento de linhas de transmissão, as sobretensões são

influenciadas pelas características e condições de operação do sistema, como o comprimento da linha, a presença de compensação reativa e a potência de curto-circuito do sistema alimentador, e pelas principais características dos disjuntores, como a dispersão entre os contatos, a presença de resistores de pré-inserção e a taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica (TDSD). Embora as sobretensões sejam resultado da ação de um equipamento de manobra, este pode ser utilizado para reduzir essas sobretensões a partir do uso de resistores de pré-inserção ou controle dos instantes de fechamento dos contatos (GARZON, 1997). Este último corresponde às técnicas de chaveamento controlado.

Os principais aspectos das manobras de energização e de religamento de linhas, as quais são comumente realizadas no sistema elétrico de potência, são apresentados a seguir.

2.1.1 Manobra de Energização

A manobra de energização de uma linha de transmissão é realizada, em geral, a partir da energização de um dos terminais da linha, o terminal emissor (local), com o outro terminal em aberto, o terminal receptor (remoto). Deste modo, quando ocorre a energização da linha com o fechamento dos contatos do disjuntor, ondas de tensão começam a trafegar pela linha. Estas, ao alcançarem o terminal receptor, o qual está em aberto, são refletidas, e é neste ponto, em geral, onde são observadas as maiores sobretensões.

Os dois fatores mais relevantes para este tipo de manobra que contribuem para o aumento das sobretensões são: a dispersão mecânica entre os contatos do disjuntor e o acoplamento eletromagnético mútuo entre as fases. O primeiro é uma característica inerente ao equipamento de manobra, que é essencialmente um dispositivo mecânico, de modo que os polos do disjuntor não são fechados simultaneamente. E, devido ao acoplamento mútuo entre as fases, quando o primeiro polo é fechado, não haverá apenas onda de tensão na fase associada àquele polo, mas haverá também ondas de tensão se propagando nas demais fases. Logo, ao alcançar o terminal remoto, as ondas são refletidas, o que pode levar a um aumento dessas sobretensões. Então, a obtenção das máximas sobretensões no terminal receptor deve ser feita mediante a realização de um número considerável de manobras a fim de simular diferentes sequências de fechamento, o que permitirá a construção de um histograma de sobretensões máximas.

Um forma de onda típica de sobretensão causada por uma manobra de energização é mostrada na Figura 2.1. A manobra se inicia no instante t_0 , caracterizada por um período inicial transitório, com duração de alguns milissegundos, no qual se observam as maiores sobretensões. Após este período é estabelecido o regime permanente.

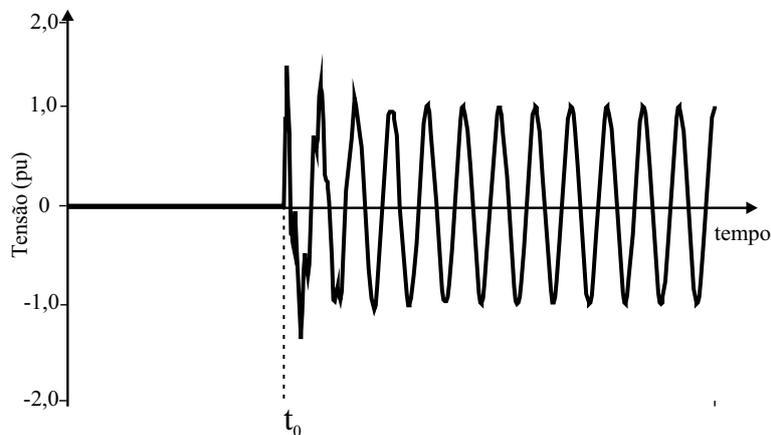


Figura 2.1. Sobretensão típica de uma manobra de energização.

2.1.2 Manobra de Religamento

O religamento de linhas de transmissão ocorre, em geral, quando há interrupção do fornecimento de energia elétrica de forma inesperada. Neste caso, o religamento automático é efetuado a fim de restabelecer o sistema o mais rápido possível. Devido ao retardo no início do fechamento dos contatos do disjuntor, a linha permanece desligada por um intervalo de tempo. Este tempo é conhecido como tempo morto, e é da ordem de 0,5 a 1,5 s (IEEE Std C37.104-2002, 2003). No SIN, o ONS estabelece um tempo de 500 ms para religamento tripolar (ONS, 2010).

Ao desligar uma linha em vazio, por exemplo, devido ao seu comportamento predominantemente capacitivo, a tensão é máxima no instante de interrupção. Com isto, uma carga residual permanece na linha, e esta não é igual em todas as fases devido ao acoplamento eletromagnético entre elas. Caso a linha seja religada antes do decaimento total da carga residual e o fechamento do disjuntor seja efetuado quando a polaridade da tensão está oposta à polaridade da carga, as sobretensões podem atingir até 5,0 pu (D'AJUZ *et al.*, 1987). O tempo de decaimento da carga depende da existência ou não de compensação reativa. Quando não há compensação, a duração do decaimento total da carga é de 2 a 5 minutos, e depende das condições climáticas, podendo chegar a 15 minutos quando as condições ambientais estão muito secas (D'AJUZ *et*

al., 1987).

Quando a linha é compensada por reatores em derivação, a carga residual passa a ter uma forma oscilatória, que é causada pela troca de energia entre a capacitância da linha e a indutância do reator. O grau de compensação da linha depende do valor dos reatores em derivação e da capacitância da linha. Para defini-lo, a linha é considerada perfeitamente transposta com reatores em derivação. A potência reativa associada à capacitância da linha é dada por:

$$Q_l = \omega \cdot C_l \cdot V^2, \quad (2.1)$$

em que C_l corresponde à capacitância equivalente da linha, V é a tensão nominal da linha e $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{nom}$, em que f_{nom} é a frequência nominal do sistema elétrico. E a potência reativa indutiva associada aos reatores em derivação é dada por:

$$Q_r = \frac{V^2}{\omega \cdot L_r}, \quad (2.2)$$

em que L_r corresponde à indutância equivalente dos reatores, e as demais variáveis são as mesmas definidas para a potência reativa capacitiva. O grau de compensação da linha de transmissão é dado por:

$$k_c = \frac{Q_r}{Q_l}, \quad (2.3)$$

A frequência de oscilação da carga residual é dada por:

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_l}}. \quad (2.4)$$

Essa frequência de oscilação é menor que a frequência fundamental do sistema e depende do grau de compensação da linha, de modo que pode ser expressa pela seguinte relação:

$$f_{osc} = f_{nom} \sqrt{k_c}, \quad (2.5)$$

Portanto, é possível observar que quanto maior for o grau de compensação, maior será a frequência de oscilação, e portanto estará mais próxima da frequência nominal do sistema. Em geral, assume valores entre 30 e 55 Hz (FROEHLICH *et al.*, 1997a).

Nas Figuras 2.2 e 2.3, são mostrados sinais de tensão típicos de manobras de religamento de uma linha de transmissão sem reatores de compensação e de uma linha com grau de compensação em derivação de 30%, respectivamente. Esses sinais de tensão correspondem ao sinal visto no terminal receptor da linha. O instante t_0 representa o início da interrupção de energia elétrica na linha, e o instante t_1 corresponde ao instante de religamento acrescido do tempo de trânsito da onda de tensão na linha, visto que a manobra é efetuada no terminal emissor da linha. Quando a linha não possui compensação reativa, uma carga residual praticamente constante permanece na linha. Enquanto que, quando a linha apresenta compensação reativa em derivação, a carga residual assume um comportamento oscilatório e apresenta decaimento.

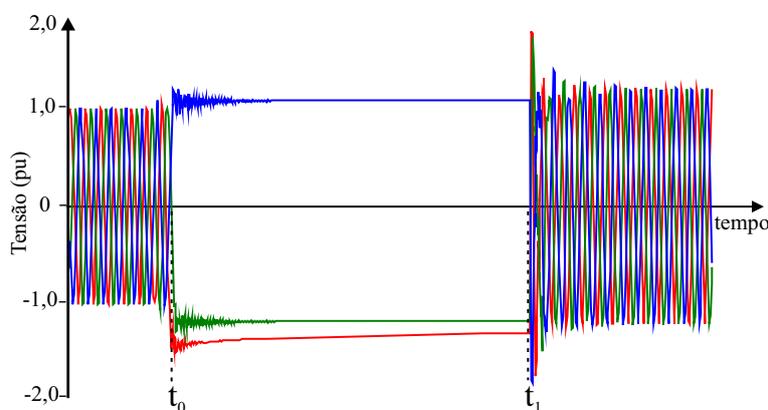


Figura 2.2. Sinal de tensão no terminal receptor de uma linha sem compensação reativa em uma manobra de religamento trifásico realizada no mesmo instante nas três fases.

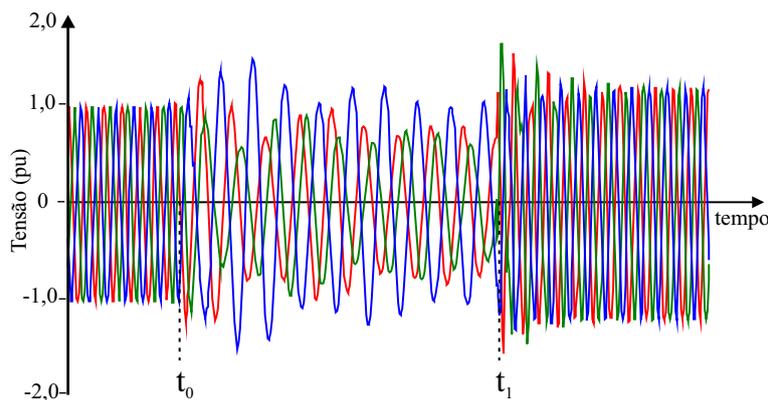


Figura 2.3. Sinal tensão no terminal receptor de uma linha com compensação reativa (30%) em uma manobra de religamento trifásico realizada no mesmo instante nas três fases.

2.2 PRINCÍPIOS DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

Conforme visto na seção anterior, as sobretensões de manobra são inevitáveis, e dependem de diversos fatores, entre eles o instante em que a manobra é realizada. De modo que, dependendo do instante de operação em uma manobra de energização ou de religamento de linha em relação ao sinal de tensão entre os contatos do disjuntor, as sobretensões geradas podem ser mínimas ou máximas. Portanto, a partir do controle dos instantes de fechamento dos polos do disjuntor é possível reduzir as sobretensões, que é o princípio do chaveamento controlado.

O termo chaveamento controlado se refere ao uso de técnicas para controlar o instante de operação dos contatos do disjuntor, seja abertura ou fechamento, a partir do monitoramento de sinais elétricos de referência (CIGRE Working Group 13.07, 1999). Para manobras de linhas de transmissão, os instantes mais adequados para a operação do disjuntor são os instantes de passagem por zero em relação ao sinal de tensão entre os seus contatos.

Em uma manobra típica de energização ou religamento de linha, os contatos do disjuntor são acionados para realizar o fechamento em um instante aleatório em relação ao sinal de tensão sobre o disjuntor. A operação não é instantânea, pois há o tempo de operação do disjuntor, t_{operao} . Além disso, dependendo da taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica do disjuntor (TDSD) e da tensão aplicada entre os contatos do mesmo, a passagem de corrente elétrica pode ser iniciada antes do acoplamento físico dos contatos devido à ocorrência de um arco elétrico, que surge em função da ruptura dielétrica do meio isolante. O intervalo de tempo entre o início do arco e o acoplamento efetivo dos contatos é conhecido como tempo de pré-arco.

Em uma manobra controlada, para que se tenha o melhor instante para efetuar a manobra, deve-se atrasar o instante de comando considerando o tempo de fechamento do disjuntor, t_{operao} . Na Figura 2.4, é mostrado um esquema simplificado que mostra como a manobra controlada é efetuada. Neste esquema, o tempo de pré-arco foi desconsiderado. Todavia, é importante enfatizar que a ocorrência do arco elétrico influencia o desempenho do método, pois pode promover o fechamento elétrico antes do fechamento mecânico dos contatos. Em Barros *et al.* (2015a) é apresentado uma análise da influência da TDSD de disjuntores em manobras controladas de linhas de transmissão. Para minimizar este efeito, pode-se atrasar o instante de fechamento por um dado intervalo de tempo baseado nas características do disjuntor.

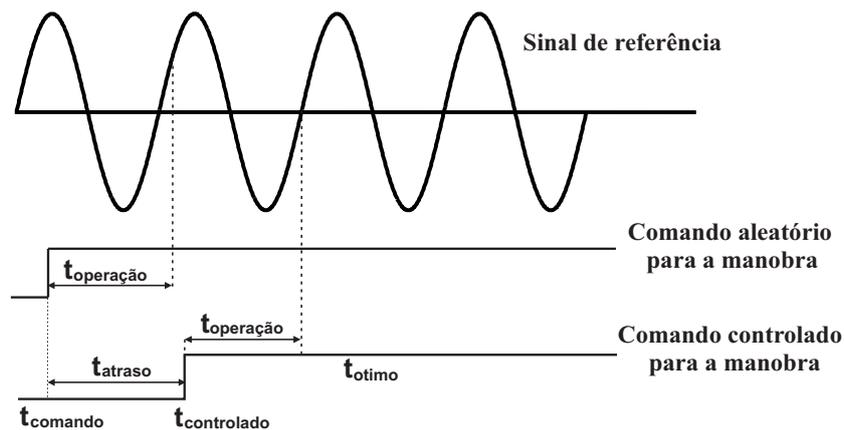


Figura 2.4. Esquema de uma manobra controlada.

Ao observar a Figura 2.4, verifica-se que quando a manobra não é controlada, o fechamento dos contatos do disjuntor ocorre em um instante aleatório, que pode favorecer o surgimento das sobretensões. Enquanto que na manobra controlada, o fechamento do disjuntor ocorre no instante mais adequado em relação ao sinal de referência. Para o caso apresentado na Figura 2.4, estes instantes correspondem aos instantes de passagem pelo zero do sinal.

As estratégias adotadas para realizar o chaveamento dependerão do tipo de manobra, ou seja, se é uma energização ou um religamento de linha, além das condições da linha, isto é, se há compensação reativa ou não. A seguir são apresentadas as estratégias de chaveamento para cada tipo de manobra.

2.2.1 Estratégia para Manobra de Energização

Para esta manobra, a estratégia do chaveamento controlado é simples, de modo que o melhor instante para realizar a energização corresponde ao instante de passagem por zero da tensão entre os contatos do disjuntor. A determinação dos melhores instantes se baseia no sinal de tensão do lado da fonte, que corresponde à tensão entre os contatos do disjuntor, já que não há carga residual na linha. Na Figura 2.5, é apresentado um sinal de tensão típico sobre o disjuntor em uma das fases da linha. Conforme indicado pelas setas, os possíveis melhores instantes são aqueles em que o sinal de tensão é zero.

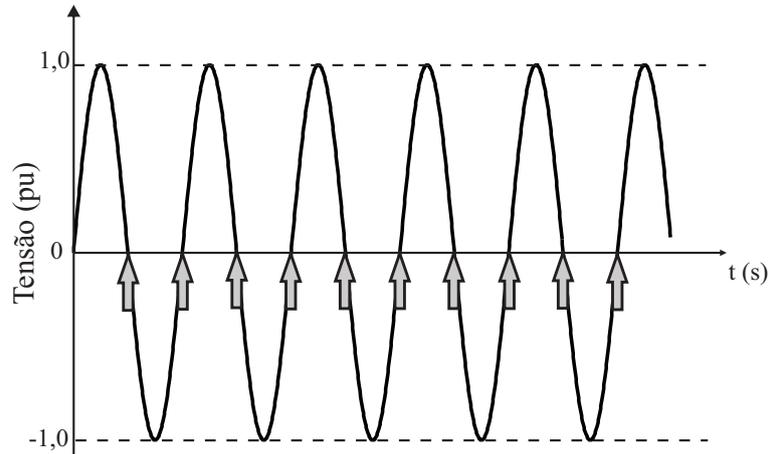


Figura 2.5. Sinal de referência para uma manobra de energização de linha de transmissão.

2.2.2 Estratégia para Manobra de Religamento

Diferentemente do que ocorre na energização de linhas de transmissão, manobras de religamento são realizadas com carga residual na linha. Quando a linha é compensada por reatores em derivação, a carga residual passa a ter uma forma oscilatória, que é causada pela troca de energia entre a capacitância da linha e a indutância do reator, cuja frequência de oscilação depende do grau de compensação. Portanto, para manobras de religamento não se pode aplicar a mesma estratégia que foi utilizada para a energização, de modo que é empregada uma estratégia para o religamento de linhas sem compensação e outra para linhas com compensação reativa em derivação.

Em linhas de transmissão sem compensação reativa, a carga residual permanece praticamente constante, em torno de $\pm 1,0$ pu, devido ao efeito capacitivo da linha. Logo, esse comportamento da carga residual provoca um deslocamento da tensão entre os contatos do disjuntor. Na Figura 2.6, são mostrados sinais típicos de tensão entre os contatos do disjuntor quando a linha não apresenta compensação reativa, considerando os dois casos possíveis: polaridade positiva e negativa da carga residual. Os possíveis melhores instantes de fechamento estão indicados pelas setas, e correspondem aos instantes de passagem por zero, isto é, os pontos em que a tensão é mínima.

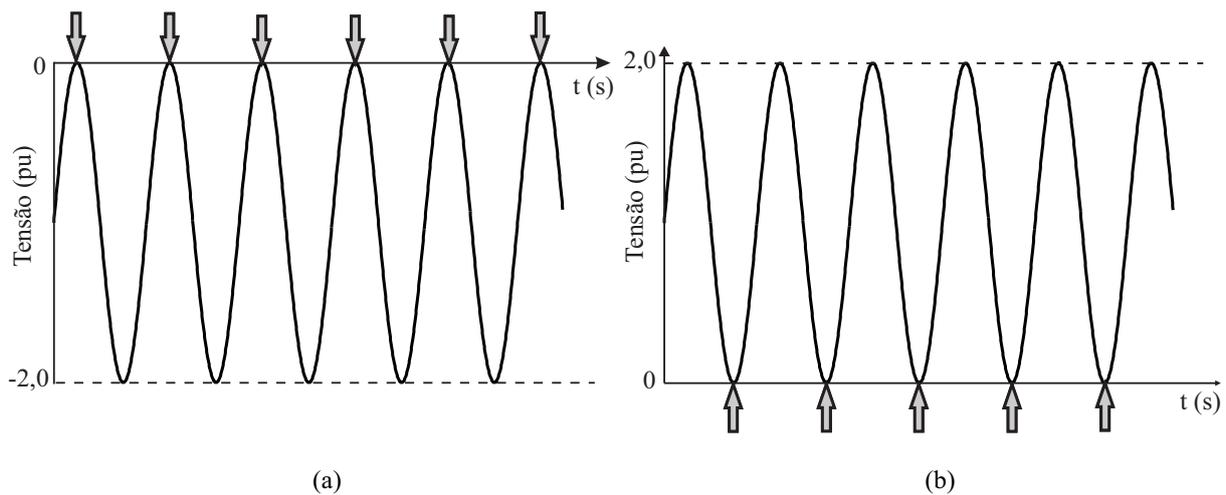


Figura 2.6. Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão sem compensação reativa: (a) carga residual com polaridade positiva (b) carga residual com polaridade negativa.

Em linhas de transmissão com compensação reativa em derivação, a depender do grau de compensação da linha, têm-se diferentes tipos de formas de onda de tensão sobre o disjuntor. Nas Figuras 2.7 e 2.8, são mostrados os sinais de tensão entre os contatos do disjuntor em uma fase para um baixo e um elevado grau de compensação, respectivamente. Apesar de existirem vários instantes de passagem por zero, o religamento da linha só deve ser efetuado em instantes presentes na região de menor batimento do sinal, conforme indicado pelas setas nas Figuras 2.7 e 2.8. Essa recomendação é feita porque nos instantes de passagem pelo zero da tensão presentes na região de maior pulsação, qualquer imprecisão pode acarretar o fechamento dos contatos do disjuntor em instantes em que a tensão está bastante elevada. Portanto, quanto maior for o grau de compensação, mais fácil ficará a detecção dos melhores instantes de fechamento do disjuntor, pois as regiões de menor batimento do sinal estão mais bem definidas. No entanto, não é interessante compensar totalmente a capacitância da linha, limitando-se até 80%, pois o uso de reatores em derivação para a compensação reativa de linhas de transmissão pode levar a circuitos ressonantes quando há mais de um circuito na mesma faixa de passagem e um deles se encontra fora de operação com suas duas extremidades não aterradas (PEREIRA, 2008).

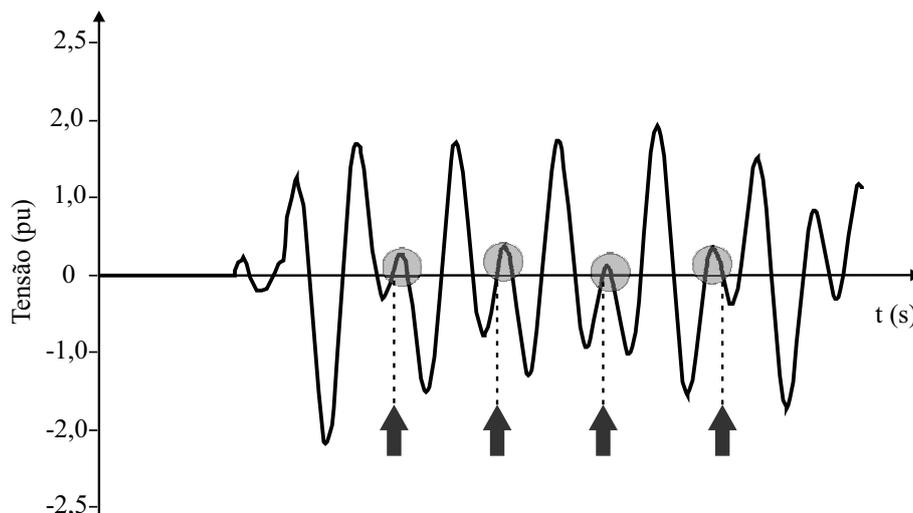


Figura 2.7. Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão com grau de compensação reativa de 30%.

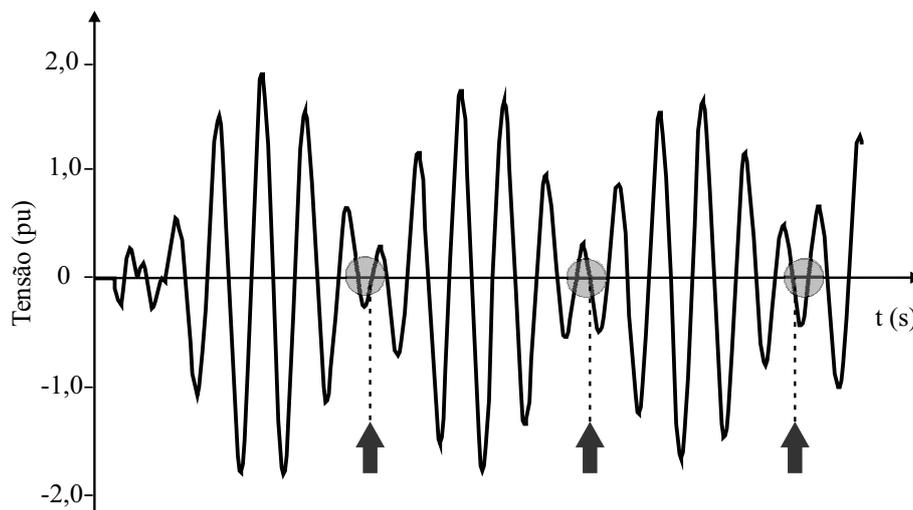


Figura 2.8. Sinal de referência para uma manobra de religamento trifásico de linha de transmissão com grau de compensação reativa de 70%.

2.3 COMPENSAÇÃO SÉRIE

A compensação série consiste em reduzir a reatância série total da linha a partir da instalação de capacitores série, o que diminui a distância elétrica entre as barras terminais. Com isso, obtém-se uma melhoria na estabilidade do sistema, tanto em regime transitório como permanente, além de auxiliar no controle da queda de tensão ao longo da linha.

O uso de bancos de capacitores série nos sistemas de transmissão tem aumentado, como se observa no SIN, onde já existem mais de 70 linhas com BCS segundo dados do ONS. Essa

utilização se deve às diversas vantagens oferecidas pela compensação série (D'AJUZ *et al.*, 1985):

1. Aumento da capacidade de transmissão de potência da linha;
2. Melhoria na estabilidade do sistema;
3. Redução das perdas e da queda de tensão ao longo da linha;
4. Melhoria na divisão de potência entre linhas de circuito duplo.

As transmissoras de energia elétrica têm investido na instalação de BCS com o objetivo, principalmente, de aumentar a capacidade de transmissão das linhas existentes, o que permite postergar a construção de novas linhas (KIRSCHNER *et al.*, 2004; SANDOVAL *et al.*, 2006; GRUNBAUM *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2012).

Apesar dos benefícios da compensação série, um dos problemas causados pelos capacitores série é o fenômeno da ressonância subsíncrona. Em uma linha com compensação série, a frequência de ressonância f_{res} resultante da troca de energia entre a reatância capacitiva do banco, X_c , e a reatância indutiva da linha, X_l , é menor que a frequência nominal do sistema f_{nom} , e por isso é denominada de frequência de ressonância subsíncrona, dada a seguir:

$$f_{res} = f_{nom} \sqrt{\frac{X_c}{X_l}}, \quad (2.6)$$

Um valor típico para o grau de compensação série é 50%, limitando-se, em geral, a 80% devido ao fenômeno de ressonância subsíncrona. Esse grau de compensação é dado pela relação entre a reatância capacitiva, X_c , associada ao banco de capacitores série e a reatância série total da linha, X_l :

$$k_c = \frac{X_c}{X_l}, \quad (2.7)$$

Em função das características do sistema elétrico, das máquinas geradoras ligadas ao sistema e do grau de compensação, oscilações subsíncronas de elevada amplitude podem ser geradas, acarretando danos às máquinas geradoras. Portanto, é importante realizar estudos para avaliar a ocorrência desse fenômeno, tanto em situações mais críticas quanto em pequenos distúrbios.

Pode-se utilizar filtros para amortecer as oscilações, ou ainda limitar o grau de compensação série para evitar a ressonância subsíncrona (D'AJUZ *et al.*, 1985).

Uma das particularidades do capacitor série como equipamento elétrico é que ele não é meramente um arranjo de elementos capacitivos, mas é composto também por um conjunto de dispositivos de proteção, os quais se destinam a proteger o capacitor série. Em função da atuação desse sistema de proteção em condições de falta, o BCS pode ser retirado temporariamente da linha, de forma parcial ou total. Essas condições variáveis de operação do banco representam um dos principais desafios quanto à aplicação do chaveamento controlado em linhas de transmissão com compensação série conforme reportado em alguns estudos (CIGRE Working Group A3.07, 2004a) e por fabricantes (ABB, 2013). Na subseção seguinte, é apresentado um esquema típico de compensação série fixa, abordando a função de cada dispositivo que compõe o BCS e como operam diante de uma perturbação no sistema.

2.3.1 Banco de Capacitores Série

Um banco de capacitor série é composto, basicamente, por unidades capacitivas, varistor de óxido metálico, centelhador, circuito de amortecimento e disjuntor de *by-pass*, conforme ilustrado na 2.9. Esse esquema de proteção é bastante utilizado, inclusive reportado em trabalhos como a configuração adotada em bancos de capacitores instalados no sistema CHESF (KIRSCHNER *et al.*, 2004; LIMA *et al.*, 2012).

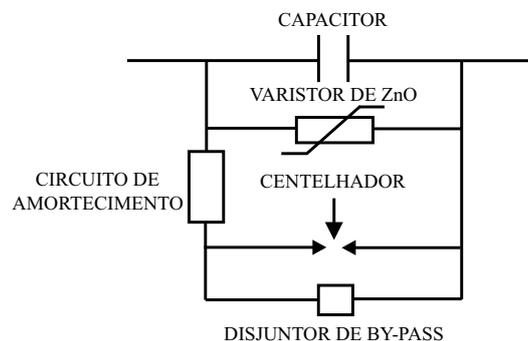


Figura 2.9. Arranjo típico de um banco de capacitores série.

O varistor de ZnO, conhecido como MOV, tem como função proteger o capacitor contra sobretensões, e é colocado em paralelo com o capacitor. Sob condições normais de operação,

devido à sua característica altamente não-linear, esse dispositivo apresenta uma resistência bastante elevada, de modo que a corrente passa normalmente pelo capacitor. No entanto, quando ocorre um defeito no sistema, se a tensão sobre o MOV ultrapassar o valor especificado em projeto, este passa a conduzir, pois a sua resistência é reduzida drasticamente, desviando a corrente do banco, e mantendo a tensão constante entre os seus terminais.

O MOV, por sua vez, é protegido por um centelhador contra excesso de absorção de energia. Este é colocado em paralelo com o conjunto capacitor série e MOV. Desta forma, a depender das condições do defeito, se o limite de absorção de energia definido em projeto é ultrapassado, o centelhador dispara, curto-circuitando o banco. Em seguida, o disjuntor de *by-pass* é fechado, desviando completamente o banco do sistema.

Quando o banco de capacitor é curto-circuitado, os efeitos da descarga do capacitor devem ser rapidamente reduzidos a fim de proteger as unidades capacitivas, o centelhador e o disjuntor. O circuito de amortecimento desempenha exatamente este papel. É composto, em geral, por um reator em paralelo com um resistor.

2.3.2 Dimensionamento de Bancos de Capacitores Série

O dimensionamento do sistema de proteção do banco se baseia nos limites de tensão. Portanto, há duas situações que devem ser consideradas: faltas internas e externas. Falta interna é aquela que ocorre na linha com compensação, enquanto que a falta externa é qualquer defeito que ocorre nos circuitos adjacentes à linha com compensação, como mostrado na Figura 2.10.

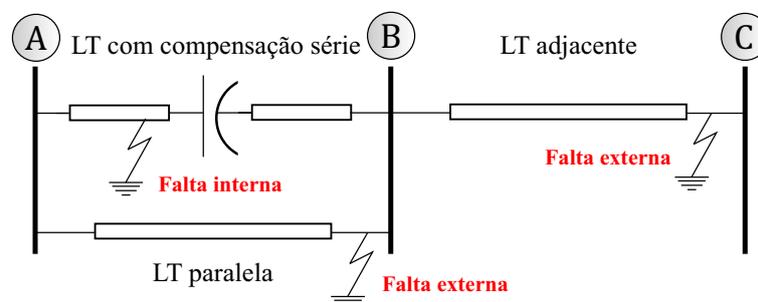


Figura 2.10. Ilustração da definição de falta interna e externa em linhas com compensação série.

Para faltas externas, o MOV deve atuar, desviando a corrente do banco, e garantindo que a tensão entre os terminais do capacitor não ultrapasse a tensão máxima definida em projeto.

A tensão a partir da qual o MOV passa a conduzir deve ser a tensão limite máxima, V_{LIM} .

Em casos de faltas internas, o centelhador em conjunto com o disjuntor de desvio pode atuar para proteger o MOV contra excesso de absorção de energia. O dimensionamento é feito a partir dos níveis máximos de corrente e energia suportados pelo MOV, $I_{MOV_{MAX}}$ e $E_{MOV_{MAX}}$. Esses limites se baseiam na falta externa mais severa que o varistor deve ser capaz de suportar. Desta forma, o centelhador deve disparar no momento em que esses valores limites são ultrapassados, e leva em torno de 1 ms para curto-circuitar o conjunto capacitor e MOV (LIMA *et al.*, 2007). A atuação do centelhador aciona o disjuntor de desvio, e após cerca de 50 ms ocorre o seu fechamento, retirando o banco do sistema. E somente após a extinção do defeito, o banco de capacitor pode ser reinsertido no sistema.

2.3.3 Local de Instalação de Bancos de Capacitores Série

Um dos aspectos de grande importância na compensação série é a localização do banco de capacitores. De modo geral, a posição ótima, tendo em vista o uso eficiente da reatância capacitiva, é no meio da linha. No entanto, também tem-se adotado outras opções, como nos terminais da linha ou ainda a partir de uma determinada distância dos terminais. Em termos de instalação e manutenção, a alternativa mais viável economicamente é nos terminais da linha, pois é instalado na subestação terminal. Outra configuração típica consiste na instalação de bancos a uma distância de 1/3 do comprimento total da linha. Então, devido às diferentes formas possíveis de localização dos bancos, é essencial avaliar o impacto de cada uma delas no sistema, pois o local de instalação tem influência em vários aspectos (ANDERSON; FARMER, 1996):

1. Eficácia da compensação série;
2. Perfil de tensão ao longo da linha;
3. Proteção da linha e do banco;
4. Manutenção do banco.

Como definido na equação 2.7, o grau de compensação quantifica quanto de capacitor série está sendo usado ao longo da linha. No entanto, a nova impedância de transferência, que é

aquela resultante da inserção do banco de capacitor, não é simplesmente a diferença entre a reatância indutiva da linha e a reatância capacitiva do banco. A nova impedância de transferência depende também da localização do banco ao longo da linha e do comprimento da linha (KUMAR *et al.*, 1970). Desta forma, fala-se em eficiência da compensação como um termo para avaliar a eficácia do capacitor série, que é definida como a taxa de redução na reatância de transferência para a reatância capacitiva da compensação série (KUMAR *et al.*, 1970).

De modo geral, a definição da localização mais adequada dos BCS no sistema envolve diversos fatores. Portanto, para uma dada finalidade e considerando os custos de instalação e manutenção e outros aspectos, uma determinada configuração que não apresente a melhor taxa de utilização dos capacitores série pode ser a mais viável.

As linhas de transmissão podem apresentar simultaneamente compensação reativa série e em derivação, com reatores em derivação instalados, geralmente, em ambos os terminais da linha. Os principais arranjos de linhas com compensação série são ilustrados na Figura 2.11:

- Capacitor série instalado em apenas um dos terminais da linha (I e III);
- Capacitor série instalado no meio da linha (II);
- Capacitor série instalado em um dos terminais da linha com reatores em derivação em ambos os terminais da linha, instalados após o BCS (IV);
- Capacitor série instalado em um dos terminais da linha com reatores em derivação em ambos os terminais da linha, instalados antes do BCS (V);
- Capacitor série instalado no meio da linha com reatores em derivação em ambos os terminais da linha (VI).

Em relação aos esquemas com ambos os tipos de compensação reativa, os arranjos (IV) e (V) são os mais utilizados, e alguns estudos indicam que (ILICETO; CINIEMI, 1977):

- reatores em derivação após o capacitor série proporcionam uma compensação mais efetiva em linhas longas;
- em geral, a diferença em termos de eficiência entre os esquemas não é grande, porém o esquema (IV) tende a apresentar melhores resultados;

- em relação ao perfil de tensão, nenhum dos esquemas apresenta mais vantagens.

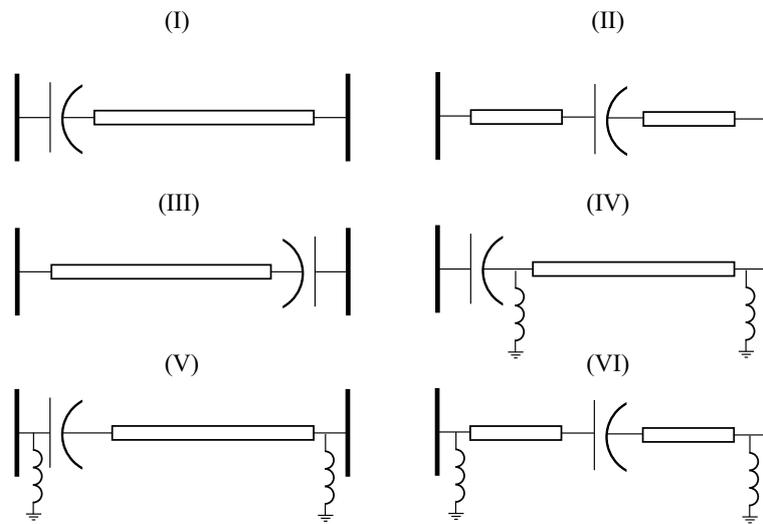


Figura 2.11. Principais arranjos de linhas com compensação reativa série.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, apresenta-se uma revisão bibliográfica com as principais publicações referentes a chaveamento controlado de linhas de transmissão, importantes para o desenvolvimento deste trabalho, destacando vantagens e limitações dos principais métodos encontrados na literatura até o presente momento. Dentre os métodos abordados, diferentes técnicas para estimação do sinal de referência podem ser utilizadas, das mais complexas, como algoritmos de reconhecimento de padrão, às mais simples, como detecção de passagens por zero. Além disso, observa-se que a maioria das técnicas se destina a linhas com compensação reativa em derivação, o que evidencia a importância de avaliar tal aplicação para linhas com compensação reativa série.

3.1 MÉTODOS DE CHAVEAMENTO CONTROLADO

O primeiro dispositivo para chaveamento controlado de linhas de transmissão com compensação reativa em derivação foi instalado em uma linha de 500 kV da companhia elétrica canadense *British Columbia Hydro and Power Authority* (BC Hydro) (FROEHLICH *et al.*, 1997a). O algoritmo utilizado para determinar os melhores instantes de fechamento despreza o efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases, e é baseado em reconhecimento de padrões, cujo sinal de referência é a tensão entre os contatos do disjuntor. O algoritmo foi testado a partir de simulações via analisador de rede e EMTP (*Eletromagnetic Transients Program*), além de testes em campo (FROEHLICH *et al.*, 1997b). Combinado com o uso de para-raios, a técnica de chaveamento controlado se mostrou robusta e eficaz na redução das sobretensões, dispensando o uso de resistores de pré-inserção. No entanto, para casos com grau de compensação reativa baixo, verificou-se que o dispositivo de chaveamento controlado não determinou os melhores instantes para todas as fases, visto que as regiões de menor batimento dos sinais de tensão entre os contatos do disjuntor não estão bem definidas.

Em Wallner & Richter (2006) é apresentado um algoritmo para religamento automático tripolar para linhas com compensação reativa em derivação, baseado no método de Prony. Este método consiste no ajuste de um conjunto de dados a uma soma de funções senoidais com decaimento exponencial, cujo sinal de referência é o sinal de tensão entre os contatos do disjuntor. Portanto, uma das vantagens deste método em relação aos algoritmos baseados em reconhecimento de padrões é a possibilidade de estimar as componentes do sinal independente do comprimento da janela adotado, ou seja, independente do grau de compensação da linha. No entanto, requer maior tempo de processamento. Nesse algoritmo é considerada a taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica do disjuntor, de modo que os instantes ótimos calculados na primeira etapa podem ser atrasados a fim de evitar a ocorrência de um pré-arco. Além disso, o efeito do acoplamento eletromagnético entre fases é considerado. Para reduzir o erro inserido por este efeito, o último polo do disjuntor a ser fechado deve ser aquele que apresentar a menor taxa de crescimento de tensão na passagem por zero. Enquanto que o segundo polo será aquele com a segunda menor taxa de crescimento de tensão na passagem por zero, caso não haja uma sequência pré-estabelecida.

Em Dantas *et al.* (2008) é apresentado um método de chaveamento controlado para manobras de energização e religamento de linhas de transmissão não compensadas e com compensação em derivação. Este método se baseia na estimação de sinais de referência em instantes futuros, utilizando técnicas simples para detecção de passagens por zero a fim de determinar um conjunto de instantes ótimos de fechamento. Além disso, os melhores instantes de cada fase são escolhidos de modo que o intervalo de tempo entre o primeiro polo a ser fechado e o último seja o menor possível, reduzindo o erro inserido com o efeito do acoplamento eletromagnético. Devido à complexidade do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor, principalmente para linhas com compensação reativa em derivação, os sinais de referência adotados neste método são os sinais de tensão do lado da fonte e do lado da linha. O desempenho do método é testado a partir de simulações via *Alternative Transients Program* (ATP), com um sistema de 500 kV, em que se avaliam casos de energização e religamento, considerando a presença de carga residual na linha e a influência do grau de compensação reativa. O desempenho do método é comparado com os resultados obtidos com resistores de pré-inserção, constatando-se a eficiência do método proposto. No entanto, para manobra de religamento, o método é aplicado apenas para os casos em que a abertura da linha não é causada por uma falta.

Um algoritmo baseado na forma de onda da tensão entre os contatos do disjuntor, independente dos instantes de passagem por zero, é apresentado em Mestas *et al.* (2011b). A partir do envelope do sinal de tensão sobre o disjuntor, determina-se a primeira região de menor batimento após o tempo morto da linha, considerado como 200 ms, na qual é efetuada a manobra de religamento. O desempenho do método é apresentado a partir de resultados obtidos via simulador digital em tempo real, em que o algoritmo foi implementado em *hardware*, e diversas condições foram avaliadas. Dentre as análises realizadas, verificou-se a influência da compensação série a partir de simulações em uma linha com 90% de compensação em derivação e 50% de compensação série. Constatou-se que, para esse caso a influência da compensação série é mínima, e portanto, não comprometeu a eficiência do método. No entanto, esta avaliação se resumiu a incluir uma capacitância série na linha, de modo que as condições variáveis de operação de um BCS não foram avaliadas.

A eficiência do método proposto em Mestas *et al.* (2011b) é comparada com três casos: sem aplicação de método para redução de sobretensões, com RPI e com o método que se baseia na estimação dos instantes de passagem por zero. A partir dos resultados, verifica-se que o método proposto apresenta desempenho similar aos métodos de chaveamento controlado que se baseia na estimação da passagem por zero da tensão entre os contatos do disjuntor. Os autores destacam como principal vantagem do método proposto a redução no tempo de religamento. No entanto, deve-se enfatizar que o tempo morto típico da linha é de 500 ms (ONS, 2010). Portanto, se esse tempo é considerado, a primeira região de menor batimento apresenta valores de tensão mais elevados em função do decaimento da carga residual, o que pode resultar na operação em um instante cuja tensão seja elevada, conforme apresentado em (DANTAS *et al.*, 2011).

No trabalho de Seyedi & Tanhaeidilmaghani (2013), é apresentado um método de chaveamento controlado para religamento de linhas de transmissão sem compensação reativa. Neste caso, a carga residual da linha é caracterizada por uma tensão em corrente contínua com decaimento exponencial, de modo que essa tensão não é reproduzida corretamente nos terminais secundários de um transformador de potencial capacitivo. No método proposto, é necessário apenas determinar a polaridade da carga residual, que é obtida a partir da última medição registrada pelo relé antes da abertura da linha, admitindo que o religamento se deve à ocorrência

de uma falta. Com isto, dependendo da polaridade da carga residual, determina-se o melhor instante de fechamento em função da tensão do lado da fonte. Se a polaridade for positiva, o fechamento deve ser feito no instante em que a tensão do lado da fonte for $V_{max}/2$. Caso a polaridade seja negativa, o melhor instante corresponde àquele em que a tensão do lado da fonte é igual a $-V_{max}/2$. Os autores apresentam uma análise comparativa com o método convencional, cujo instante ótimo corresponde ao instante em que a tensão do lado da fonte é igual à tensão do lado da linha. O método proposto apresenta melhor resultado, já que no método convencional a informação da tensão do lado da linha não é precisa devido às distorções na saída do TPC.

Em Dantas *et al.* (2014) é apresentado um algoritmo para religamento controlado de linhas com compensação em derivação, que é resultado de um aprimoramento do método apresentado em Dantas *et al.* (2008). Neste método, utiliza-se a transformação de Karrenbauer para separar as componentes de frequência contidas nos sinais sob análise, visto que são consideradas condições de falta. Com o algoritmo proposto, é possível determinar a extinção de faltas do tipo fase-terra e fase-fase-terra, o que evita um religamento sob falta, e também reduz o tempo morto da linha. O desempenho do algoritmo é testado a partir de simulações em um simulador digital em tempo real, em que são avaliados casos com diferentes graus de compensação sob diferentes condições de falta. Além disso, é feita uma análise de sensibilidade por meio da realização de simulações em um programa do tipo EMTP, em que se avalia a influência do grau de compensação em derivação na detecção da extinção da falta. Registros oscilográficos do sistema CHESF também são avaliados. Em todos os casos, o método proposto mostrou-se eficiente na redução das sobretensões de manobra, além da redução do tempo morto da linha a partir da detecção da extinção da falta. Para faltas trifásicas e bifásicas sem a terra, o método não é aplicado.

Para aplicação de religamento controlado de linhas de transmissão sem compensação reativa, é proposto em Dantas *et al.* (2015) o uso de um filtro digital recursivo para corrigir a resposta transitória do TPC a fim de estimar a carga residual da linha, visto que o TPC não reproduz sinais de tensão em corrente contínua. A estratégia de chaveamento controlado é a mesma apresentada em Dantas *et al.* (2008), que se baseia na estimação dos sinais de tensão do lado da fonte e na determinação da polaridade da carga residual. Resultados de simulações

realizadas via ATP são apresentados, constatando que com a compensação da resposta do TPC é possível estimar corretamente a polaridade da carga residual, o que permite que o chaveamento controlado seja aplicado com sucesso em linhas sem compensação reativa. No entanto, situações em que a carga residual pode ser diferente de $\pm 1,0$ pu, como a abertura da linha devido a uma falta, a informação da polaridade não é suficiente para garantir o sucesso do chaveamento controlado. Neste caso, os melhores instantes de fechamento podem ser diferentes dos instantes de pico da tensão do lado da fonte com a mesma polaridade da carga residual.

A avaliação computacional da eficácia do método proposto em Dantas *et al.* (2014) é apresentada em Gregory *et al.* (2018) a partir de simulações via ATP. O método é testado para diferentes condições de operação do sistema, incluindo variações no intervalo de duração de falta, local de falta, impedância de falta, além de considerar desequilíbrios de tensão. Portanto, o objetivo do trabalho é avaliar o desempenho da técnica diante de condições não ideais de operação do sistema elétrico. Para a análise de faltas fase-terra, o religamento após a detecção da extinção da falta foi realizado com sucesso em 100% dos casos com impedância de falta variando de 1 a 200 Ω . Nos casos de falta fase-fase-terra, para algumas condições de desequilíbrio de tensão e impedância de falta, o religamento falhou. E os casos que resultaram em um alto percentual de falha no processo de religamento foram para os defeitos de alta impedância, considerando uma impedância de 500 Ω , devido a não detecção da extinção da falta. No entanto, é importante enfatizar que faltas de alta impedância não são típicas em sistemas de transmissão.

De acordo com as técnicas apresentadas, apenas uma delas considerou a presença de compensação série ao avaliar a eficiência do chaveamento controlado Mestas *et al.* (2011b). No entanto, a compensação série foi modelada apenas como uma capacitância série e a abertura da linha não foi causada por uma falta. Desta forma, as condições variáveis de operação do BCS não foram avaliadas. Em Froehlich *et al.* (1997b), o desempenho do método de chaveamento controlado é avaliado em uma linha de transmissão com reatores em derivação e capacitores série, porém o BCS é desviado para aplicar o chaveamento controlado. Portanto, dentre os algoritmos apresentados, observa-se que existe uma carência quanto à avaliação do chaveamento controlado em linhas com compensação série.

Em alguns trabalhos do CIGRÉ (*Conseil International Des Grands Réseaux Électriques*), o chaveamento controlado é avaliado em linhas apenas com compensação série para casos es-

pecíficos a partir de estratégia adotada para linhas não compensadas (CIGRE Working Group A3.07, 2004a; CIGRE Working Group A3.07, 2004c).

Em CIGRE Working Group A3.07 (2004a), destaca-se como principal dificuldade dessa aplicação, a presença de uma carga residual com distribuição não uniforme ao longo da linha devido à queda de tensão no capacitor série. Portanto, a distribuição da carga residual no trecho da linha entre o terminal local e BCS não é a mesma vista no trecho entre o BCS e terminal remoto. Além disso, oscilações durante a abertura da linha devido a uma falta podem dificultar a estimação da tensão do lado da linha. Como exemplo, uma falta monofásica BT é simulada em uma linha apenas com compensação série, com um BCS localizado no meio da linha. Neste caso, apenas a fase B é retirada de operação. A estratégia de chaveamento controlado adotada se baseia na estimação do instante de pico da tensão do lado da fonte que apresenta a mesma polaridade da carga residual. Esta é a estratégia adotada para o chaveamento controlado de linhas não compensadas. Apesar da redução das sobretensões neste caso, evidencia-se a necessidade de avaliar mais casos, visto que diversos fatores, como a configuração da linha e as condições de operação do BCS, podem influenciar o desempenho do chaveamento controlado.

Em CIGRE Working Group A3.07 (2004c), outros casos são avaliados para a mesma configuração de linha, ou seja, com compensação série instalada no meio da linha. Uma falta monofásica BT é avaliada nos dois trechos da linha, isto é, entre o terminal local e o BCS e entre o BCS e o terminal remoto da linha. Em ambos os casos, avalia-se também o impacto da sequência de abertura e religamento dos disjuntores. Mesmo nos casos em que as sobretensões estão acima de 2,0 pu, ao comparar com a manobra sem chaveamento controlado constata-se a redução das sobretensões.

Em Barros *et al.* (2015b), o desempenho de técnicas destinadas a linhas não compensadas e com compensação em derivação é avaliado para linhas com compensação série. A análise é feita para casos de religamento sem ocorrência de falta, com a compensação série modelada como um elemento capacitivo concentrado. Portanto, a influência das condições de operação do banco de capacitores série não é considerado, visto que o sistema de proteção do BCS não é modelado. De acordo com os resultados apresentados, as técnicas de chaveamento controlado proporcionaram a redução das sobretensões para todas as configurações avaliadas, incluindo linhas apenas com compensação série e linhas com ambos os tipos de compensação reativa.

3.2 SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

De acordo com a revisão bibliográfica, verificou-se que existem diferentes técnicas de chaveamento controlado aplicadas para redução de sobretensões de manobras de linhas de transmissão. Desde técnicas mais complexas, com a utilização de algoritmos de reconhecimento de padrões (FROEHLICH *et al.*, 1997a), até técnicas mais simples baseadas na detecção de passagens por zero dos sinais de tensão (DANTAS *et al.*, 2008). No entanto, conforme se observa, não existem técnicas destinadas a linhas com compensação série. Na Tabela 3.2, apresenta-se um resumo da revisão bibliográfica, indicando a aplicação dos trabalhos referenciados quanto à configuração da linha, e as limitações de cada um deles.

Em Mestas *et al.* (2011b) é feita uma análise de sensibilidade a fim de verificar a influência da presença de capacitores série em linhas com compensação em derivação. No entanto, é avaliado apenas um caso, e não são considerados casos de linhas apenas com compensação série. Além disso, a compensação série é modelada apenas como um elemento capacitivo, desprezando o sistema de proteção do BCS.

A aplicação do chaveamento controlado em linhas com compensação série não é uma aplicação convencional. Diferentemente do que ocorre em linhas com compensação reativa em derivação ou sem compensação reativa, em que a carga residual se distribui uniformemente ao longo da linha, em linhas com compensação série isto não ocorre (CIGRE Working Group A3.07, 2004a). Devido às condições variáveis de operação do banco de capacitor série, isto é, se o banco é retirado ou não após uma perturbação no sistema, além da queda de tensão no capacitor série, a tensão do lado da linha torna-se imprevisível (ABB, 2013).

A partir de algumas análises apresentadas em CIGRE Working Group A3.07 (2004c), Barros *et al.* (2015b), verifica-se o potencial do chaveamento controlado em linhas com compensação série quanto à redução das sobretensões. No entanto, é necessário analisar a resposta dos sinais de tensão do lado da linha para diferentes condições de operação do BCS, a fim de avaliar os desafios e propor soluções para viabilizar o uso de técnicas de chaveamento controlado.

No capítulo seguinte, apresenta-se uma análise da carga residual resultante da abertura trifásica de linhas com compensação série, considerando os principais arranjos com BCS e as diferentes condições de operação deste equipamento. O objetivo é avaliar as características

dos sinais de tensão do lado da linha com a presença de capacitores série, a fim de identificar as particularidades e similaridades em relação aos sinais de tensão dos casos já amplamente conhecidos e abordados na literatura, que é para linhas com compensação reativa em derivação e não compensadas.

Tabela 3.1. Síntese da revisão bibliográfica referente a chaveamento controlado de linhas de transmissão.

Referência	Aplicação (Comp. Reativa)			Limitações
	Sem	Shunt	Série	
Froehlich <i>et al.</i> (1997a)		X		Não se aplica a casos com falta
CIGRE Working Group A3.07 (2004c)			X	Apenas alguns casos são avaliados
Wallner & Richter (2006)		X		Exige maior tempo de processamento
Dantas <i>et al.</i> (2008)	X	X		Não se aplica a casos com falta
Mestas <i>et al.</i> (2011b)		X	X	Baseia-se em um tempo morto de 200 ms
Seyedi & Tanhaeidilmaghani (2013)	X			Não considera o valor da carga residual
Dantas <i>et al.</i> (2014)		X		Apenas para casos de falta fase-terra e fase-fase-terra
Dantas <i>et al.</i> (2015)	X			Não se aplica a casos com falta
Barros <i>et al.</i> (2015b)			X	Avaliação apenas de casos sem falta

ANÁLISE DA CARGA RESIDUAL EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Manobras de religamento ocorrem com a presença de carga residual na linha, cujas características dependem do arranjo da linha quanto à compensação reativa. Deste modo, as linhas podem ser classificadas como:

- linhas sem compensação reativa;
- linhas apenas com compensação reativa em derivação (reatores shunt);
- linhas apenas com compensação reativa série (capacitores série);
- linhas com compensação reativa série e em derivação simultaneamente.

Conforme visto no Capítulo 3, as principais técnicas de chaveamento controlado encontradas na literatura e aplicadas em campo são destinadas a linhas sem compensação reativa e com compensação em derivação. Portanto, as características da carga residual nestes casos já são bem conhecidas. Em linhas não compensadas, a carga residual é um sinal de tensão em corrente contínua, cuja constante de decaimento é muito baixa devido à pequena condutância *shunt* da linha. Em linhas com reatores *shunt*, a carga residual é um sinal de tensão oscilatório devido à troca de energia entre a capacitância da linha e a indutância dos reatores *shunt*. A carga residual se distribui uniformemente ao longo da linha em ambos os casos.

Em linhas com compensação série, devido à presença do capacitor série na linha e às condições variáveis de operação do BCS, a carga residual pode não apresentar uma distribuição uniforme ao longo da linha. Isto pode comprometer o desempenho do chaveamento controlado, pois a distribuição da carga residual no trecho entre o terminal local e o BCS pode ser diferente da distribuição no trecho entre o BCS e terminal remoto. Como o dispositivo de chaveamento

controlado se baseia nas medições de um dos terminais da linha, a redução das sobretensões pode ser comprometida devido à essa diferença de tensão ao longo da linha.

Neste capítulo, uma análise da carga residual para diferentes arranjos de compensação série, considerando as condições variáveis de operação do BCS, é realizada a partir de simulações via ATP. Na Figura 4.1, é apresentado um fluxograma mostrando as condições de operação do BCS em função da causa de abertura da linha. Esta análise é fundamental para avaliar a estratégia que pode ser empregada para o chaveamento controlado de linhas com compensação série.

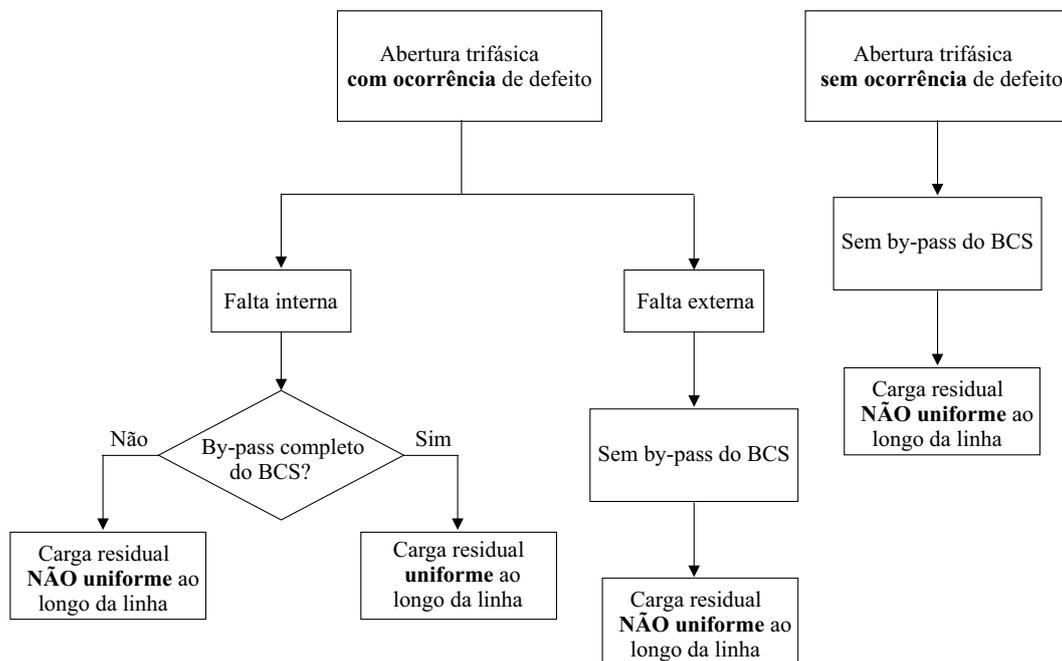


Figura 4.1. Condições de operação do BCS em função da causa de abertura da linha de transmissão com compensação série.

A abertura da linha pode ser causada por uma ocorrência de defeito, como um curto-circuito, ou não, como uma rejeição de carga. A causa da abertura influencia diretamente a operação do BCS devido à atuação da proteção da compensação série. Como apresentado no Capítulo 2, se a abertura da linha não é decorrente de um defeito na linha com compensação série, o MOV deve proteger o capacitor série contra as máximas sobretensões, a fim de garantir que o banco permaneça em operação. Enquanto que no caso de uma falta interna, o BCS pode ser retirado de operação, de forma parcial ou total. As seguintes estratégias para o *by-pass* do BCS podem ser adotadas:

- todas as fases são desviadas, independente do tipo de falta;

- apenas as fases envolvidas na falta que tenham atingido os limites de corrente e/ou energia dissipada no MOV são desviadas.

Neste trabalho, a última estratégia é adotada, em que o *by-pass* pode ocorrer em uma ou nas três fases do BCS, tipicamente utilizada nos sistemas da CHESF (KIRSCHNER *et al.*, 2004). Então, se os limites de corrente ou energia no MOV são alcançados em duas fases, o *by-pass* deve ocorrer nas três fases. No entanto, se esses limites forem atingidos apenas em uma fase, o *by-pass* do BCS é parcial, ocorrendo apenas naquela fase. Esses limites de corrente e energia dissipada no MOV são definidos em projeto e se baseiam nos dados de falta externa, conforme apresentado no Capítulo 2.

A partir da Figura 4.1, observa-se que a carga residual resultante em linhas com compensação reativa série não apresenta uma distribuição uniforme ao longo da linha na maioria dos casos. Quando o BCS permanece em operação na linha, seja porque a abertura da linha não foi causada por um defeito, ou por se tratar de uma falta externa, ou ainda se for uma falta interna que não leve ao *by-pass* completo do BCS, a carga residual apresenta uma distribuição não uniforme ao longo da linha devido à queda de tensão no capacitor série. Enquanto que no caso de uma abertura causada por uma falta interna que leve ao *by-pass* total do banco, a carga residual resultante apresenta uma distribuição uniforme ao longo da linha. Portanto, no caso de linhas apenas com compensação série, o *by-pass* total do BCS resulta em uma linha não compensada, e para linhas com ambos os tipos de compensação reativa, resulta em uma linha apenas com compensação em derivação. Ambos os casos já são conhecidos e existem técnicas de chaveamento controlado aplicadas com sucesso (FROEHLICH *et al.*, 1997a; WALLNER; RICHTER, 2006; MESTAS *et al.*, 2011a; SEYEDI; TANHAEIDILMAGHANI, 2013; DANTAS *et al.*, 2014).

O objetivo, neste capítulo, é apresentar uma avaliação da carga residual para os principais arranjos de linhas com compensação série, considerando vários cenários de abertura de linha, a partir de simulações via ATP em um sistema elétrico de 500 kV. A seguir são apresentados os dados do sistema modelado para esta análise.

4.1 SISTEMA ELÉTRICO UTILIZADO

Na Figura 4.2, é mostrado o esquema básico do sistema elétrico modelado no ATP, cujos dados são referentes a uma linha de 500 kV da CHESF. Trata-se de um sistema composto por uma linha de transmissão perfeitamente transposta com 400 km de extensão, com para-raios de óxido de zinco instalados em ambos os terminais. Os sistemas adjacentes são representados por duas fontes de tensão equivalentes e suas respectivas impedâncias. Os dados do sistema são apresentados nas Tabelas 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

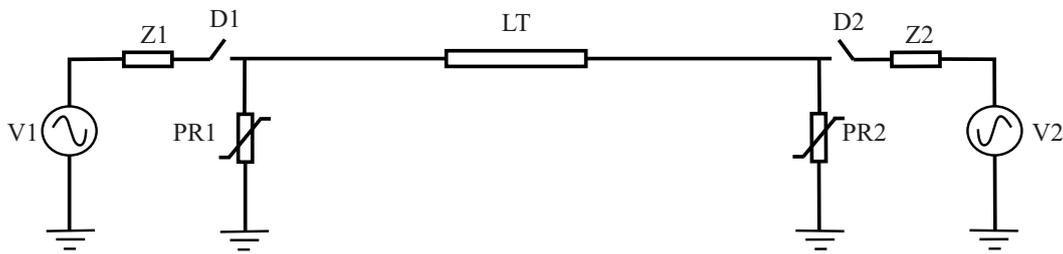


Figura 4.2. Esquema do sistema elétrico modelado no ATP.

Tabela 4.1. Módulo e fase das fontes de tensão (base 550 kV)

Barra	Módulo (pu)	Fase(°)
Fonte 1	1,00	0
Fonte 2	0,99	-10

Tabela 4.2. Impedâncias das fontes

Fonte	Sequência zero		Sequência positiva	
	$R_0(\Omega)$	$X_0(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$X_1(\Omega)$
Fonte 1	1,1268	20,838	0,9681	28,513
Fonte 2	1,1268	20,838	0,9681	28,513

Os arranjos de compensação série avaliados neste trabalho são aqueles apresentados na Figura 2.11, do Capítulo 2. Quanto ao BCS, o esquema apresentado na Figura 2.9 é modelado no ATP com auxílio da linguagem MODELS para o controle do *by-pass* do banco. Os dados

Tabela 4.3. Dados de sequência da linha de transmissão.

Sequência	R(Ω/km)	X (Ω/km)	$\omega C(\mu S/km)$
Zero	0,3996	0,9921	3,0839
Positiva	0,0333	0,3170	5,2033

Tabela 4.4. Característica dos para-raios de ZnO com tensão nominal de 420 kV.

Corrente (kA)	Tensão fase-terra (kV)
0,001	643,72
0,010	681,23
0,050	721,27
0,100	738,70
0,200	756,14
0,400	775,75
0,700	793,18
1,000	806,26
2,000	830,23
5,000	873,81

da curva característica do MOV adotada neste trabalho são apresentados na Tabela 4.5, e são de um BCS do sistema CHESF.

O controle do *by-pass* depende da configuração da compensação série. Portanto, para cada configuração, determinou-se os limites de corrente e energia do MOV de acordo com a falta externa mais severa, os quais definem os critérios de desvio do BCS. A falta externa mais severa consiste em uma falta trifásica na barra do sistema.

A seguir são apresentados os resultados de acordo com a causa de abertura da linha, ou seja, com ou sem a ocorrência de defeito, e de acordo com a configuração da linha, isto é, linhas apenas com compensação reativa série e linhas com ambos os tipos de compensação reativa.

Tabela 4.5. Curva VxI do MOV.

Corrente (A)	Tensão (kV)
0,1	209,38
0,5	221,87
1,0	231,25
10,0	238,75
50,0	245,75
100,0	248,75
1000,0	259,37
10000,0	276,87
100000,0	309,37

4.2 ABERTURA TRIFÁSICA DA LINHA SEM DEFEITO

Nessa primeira parte, são apresentados os resultados referentes à carga residual resultante de uma abertura tripolar sem ocorrência de defeito. De acordo com os procedimentos de rede do submódulo 23.3 do ONS (ONS, 2010), após a abertura do primeiro terminal da linha (terminal local), considerando o caso de comando de abertura por transferência de disparo, após 20 ms é realizada a abertura do segundo terminal (terminal remoto). Considerou-se a abertura das três fases no mesmo instante.

4.2.1 Caso 1.1: Linhas apenas com compensação série

Para linhas apenas com compensação série, as seguintes configurações são avaliadas:

- BCS instalado em um dos terminais da linha (esquema I da Figura 2.11);
- BCS instalado no meio da linha (esquema II da Figura 2.11).

Para ambos os esquemas, a carga residual é um sinal de tensão contínua, como ocorre em linhas sem compensação. Na Figura 4.3, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para cada configuração com compensação série, e comparados com a

carga residual resultante em linhas não compensadas. O grau de compensação série utilizado nessas simulações foi de 40%.

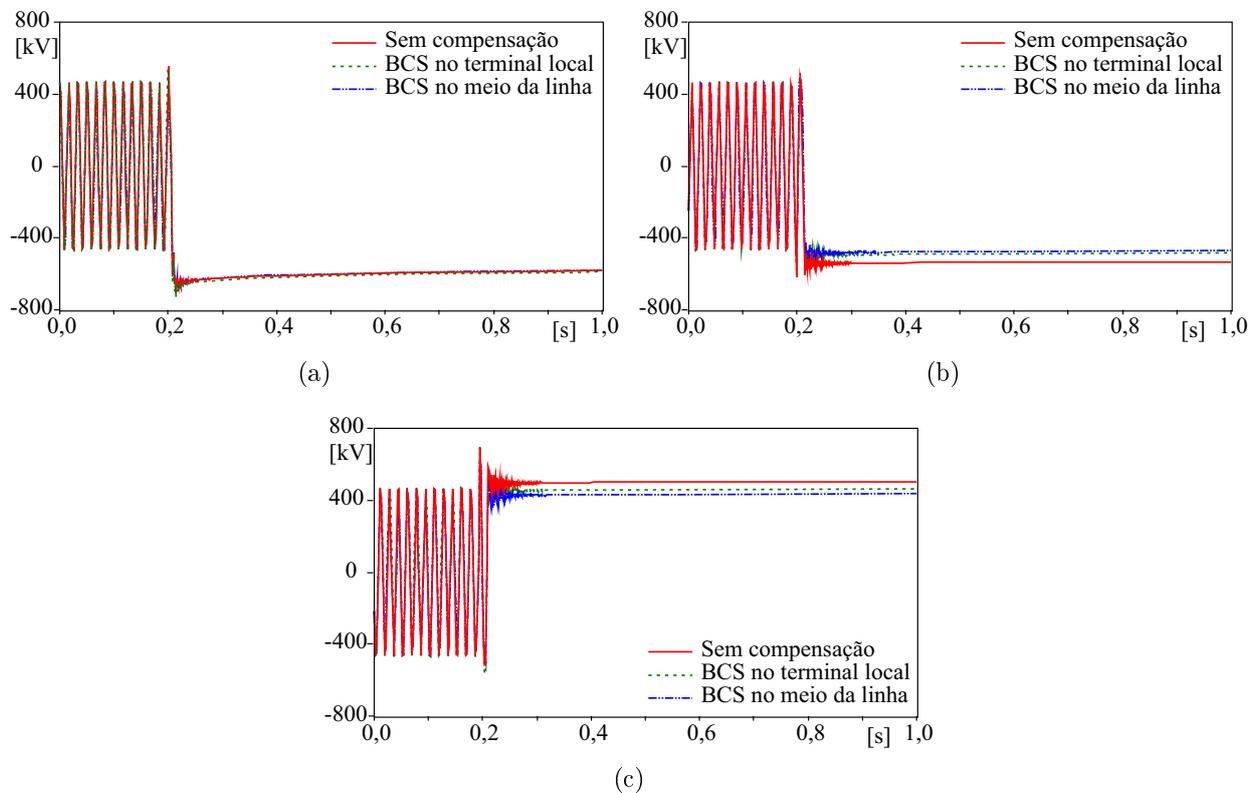


Figura 4.3. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultantes de uma abertura trifásica sem ocorrência de defeito para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e linha não compensada: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Como se observa, a característica da carga residual em linhas apenas com compensação série é similar à de linhas não compensadas. No entanto, em linhas com compensação série, devido à tensão sobre o capacitor série, a carga residual não apresenta a mesma característica antes e após o BCS. Na Figura 4.4, é possível identificar essa diferença a partir das tensões do lado da linha vistas nos terminais local e remoto da linha para a configuração I.

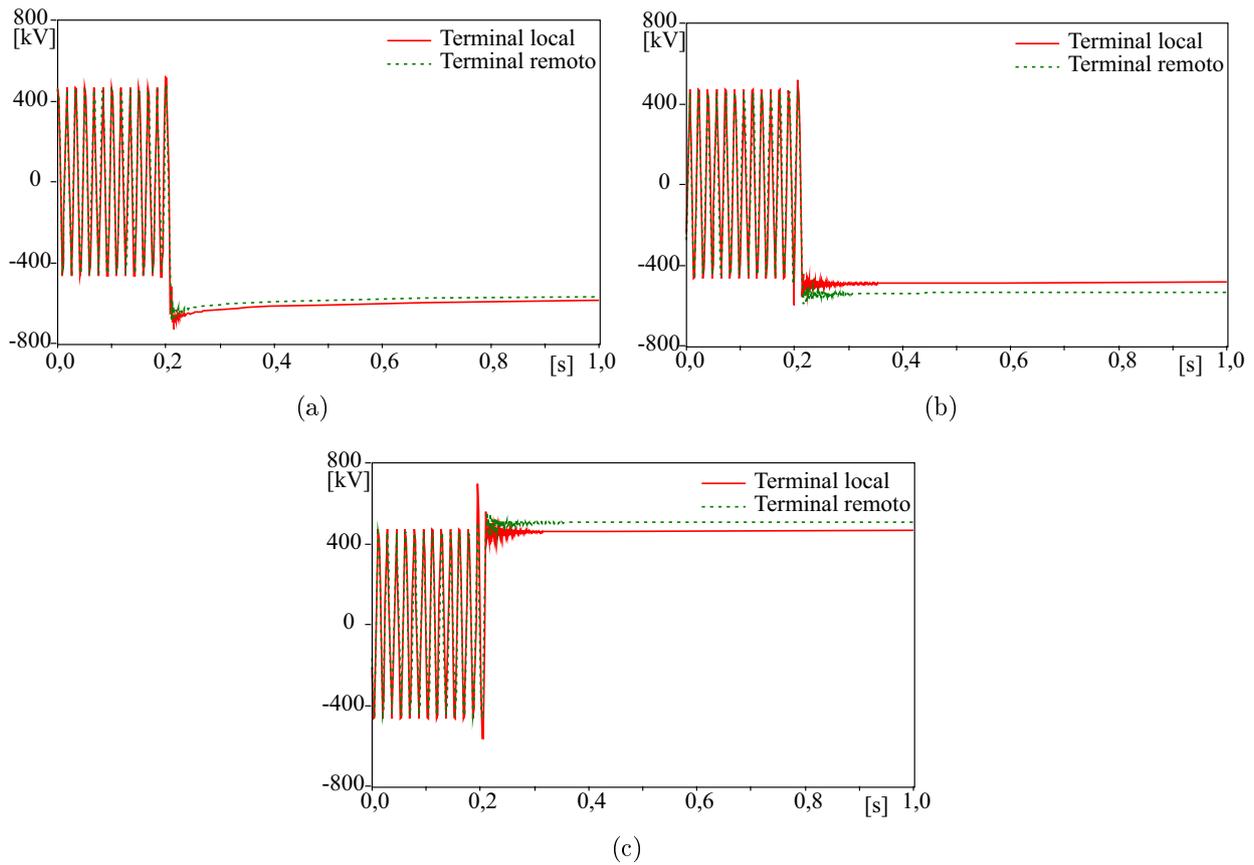


Figura 4.4. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

A diferença não é significativa, pois é a carga resultante de uma abertura trifásica sem defeito. Para o chaveamento controlado, essa diferença poderia comprometer a redução das sobretensões. No entanto, ao observar a tensão sobre o disjuntor nos dois terminais da linha na Figura 4.5, que é sinal de referência usado para a estimação dos melhores instantes de fechamento, verifica-se que são os mesmos instantes. Portanto, são os instantes de mínimo ou máximo do sinal de referência, a depender da polaridade da carga residual, se é negativa ou positiva, respectivamente. Isto se deve à pequena queda de tensão sobre o capacitor série.

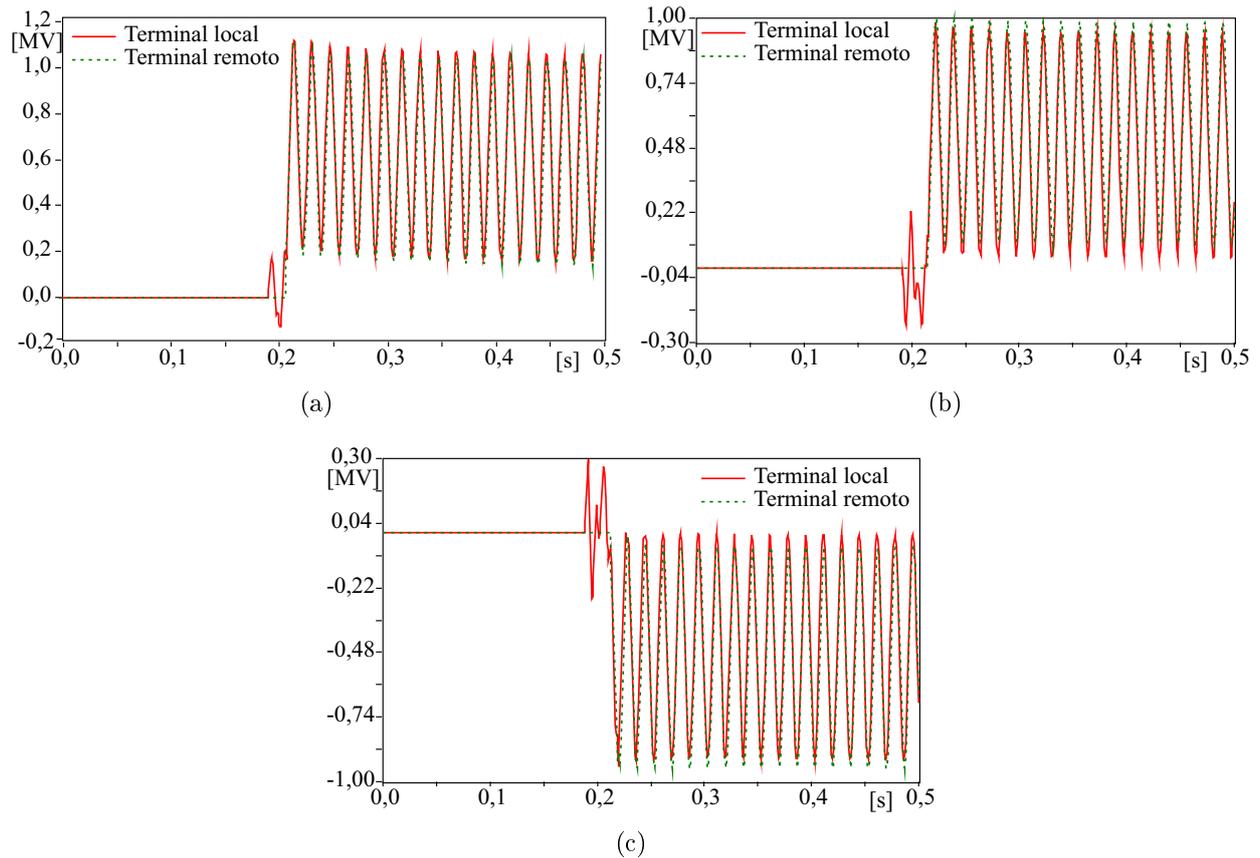


Figura 4.5. Sinais de tensão sobre o disjuntor vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

4.2.2 Caso 1.2: Linhas com compensação série e shunt

A carga residual resultante em linhas com ambos os tipos de compensação reativa é avaliada para os seguintes esquemas:

- BCS instalado no terminal local com reatores *shunt* em ambos os terminais, localizados após o banco (arranjo IV da Figura 2.11);
- BCS instalado no terminal local com reatores *shunt* em ambos os terminais, localizados antes do banco (arranjo V da Figura 2.11);
- BCS instalado no meio da linha com reatores *shunt* em ambos os terminais da linha (arranjo VI da Figura 2.11).

Na Figura 4.6, a carga residual resultante nessas três configurações de linha é comparada com a carga resultante em uma linha apenas com compensação em derivação. O grau de

compensação série adotado nas simulações é de 50%, enquanto que para a compensação *shunt* é de 70%.

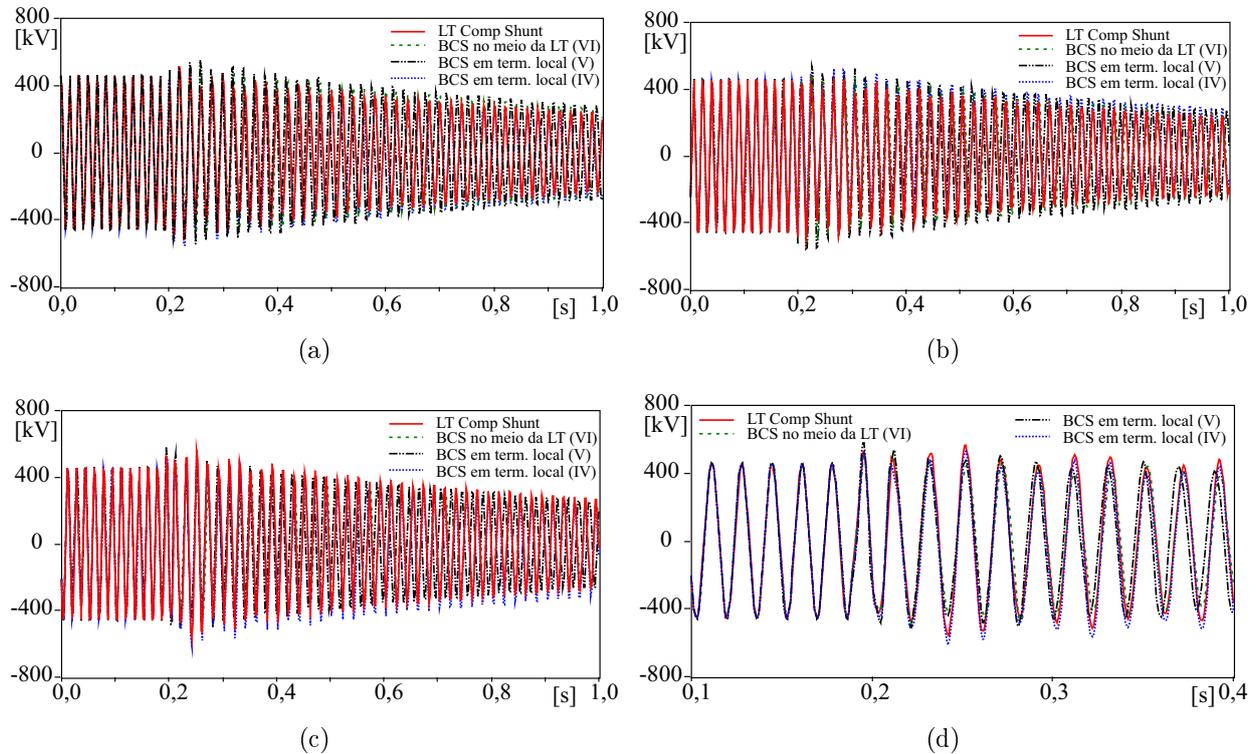


Figura 4.6. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica sem ocorrência de defeito para linhas com compensação reativa série e em derivação (arranjos IV, V e VI) e linha apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C.

Observa-se que a carga residual vista no terminal local é bastante semelhante em todos os casos. Portanto, constata-se que quando a abertura da linha não é causada por um defeito, o capacitor série tem pouca influência no comportamento da tensão do lado da linha.

Apesar da presença do capacitor série, a carga residual se distribui praticamente de forma uniforme ao longo da linha, ou seja, não há diferença significativa entre a tensão do lado da linha vista nos terminais local e remoto. Deste modo, para o chaveamento controlado seria uma situação similar ao que ocorre em linhas apenas com compensação em derivação. E conforme visto no Capítulo 3, a maioria das técnicas existentes são destinadas a linhas com compensação reativa em derivação.

4.3 ABERTURA TRIFÁSICA DA LINHA COM DEFEITO

Nesta segunda parte, a carga residual é avaliada para abertura devido à ocorrência de um defeito. Segundo os procedimentos de rede, a proteção deve atuar dentro de 100 ms para uma falta em um sistema de 500 kV. Portanto, o disjuntor de um dos terminais abre após 100 ms, enquanto que o disjuntor do outro terminal, considerando 20 ms como o tempo de transferência de disparo, após 120 ms (ONS, 2010).

4.3.1 Casos 2.1: Linhas apenas com compensação série

Vários casos foram simulados, considerando os diversos tipos de falta e local de falta. No entanto, apenas alguns foram selecionados e apresentados nesta seção a fim de avaliar as características da carga residual em situações que o BCS permanece em operação, é retirado completamente ou retirado parcialmente:

- Caso 2.1.1: falta fase-terra BT a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 2.1.2: falta fase-fase CA a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 2.1.3: falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local da linha;
- Caso 2.1.4: falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local da linha.

Os arranjos I e II são avaliados para uma compensação série de 50%. Os sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para o caso 2.1.1 são mostrados na Figura 4.7. Observa-se a similaridade com a carga residual resultante em linha não compensada. No arranjo I, ocorre o *by-pass* da fase envolvida na falta (B), enquanto que no arranjo II, o BCS permanece em operação.

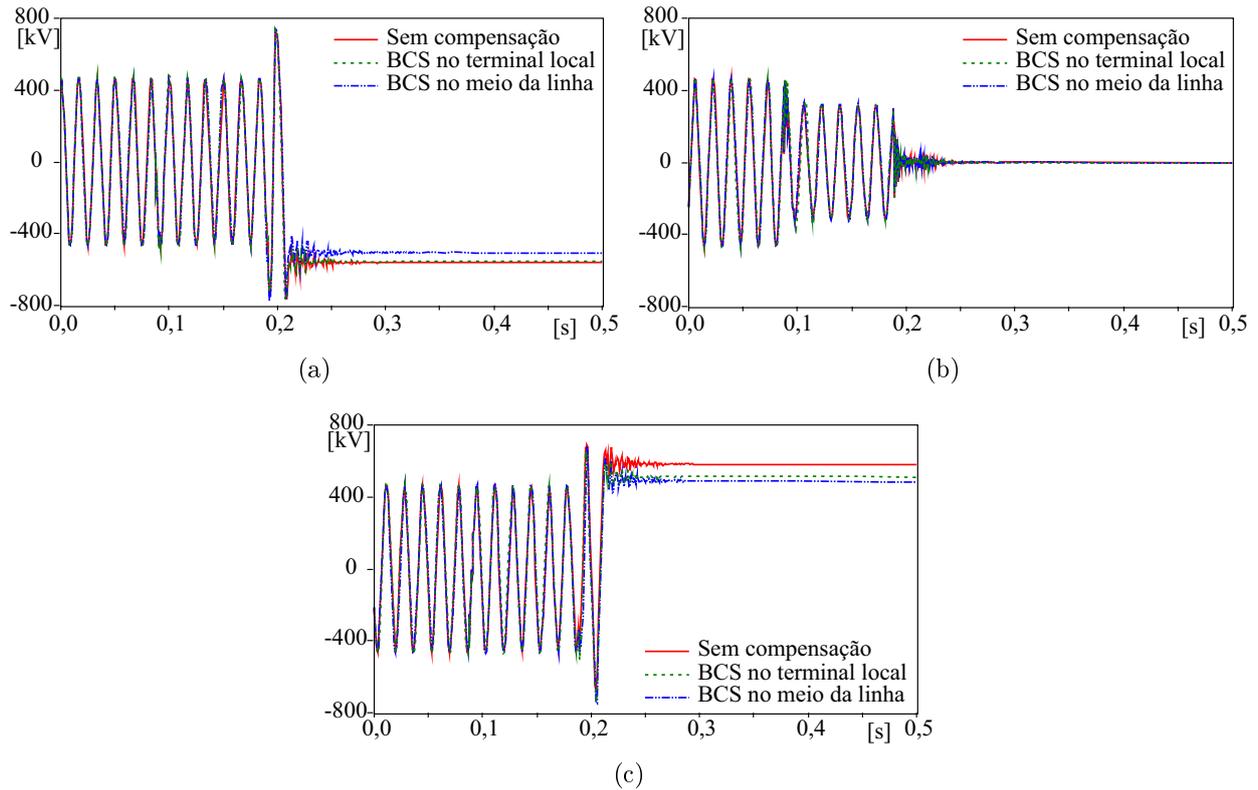


Figura 4.7. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-terra (caso 2.1.1) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

No arranjo I, ocorre o *by-pass* apenas da fase envolvida na falta, como mostrado na Figura 4.8. A diferença entre as tensões vistas nos terminais local e remoto é observada apenas na fase C.

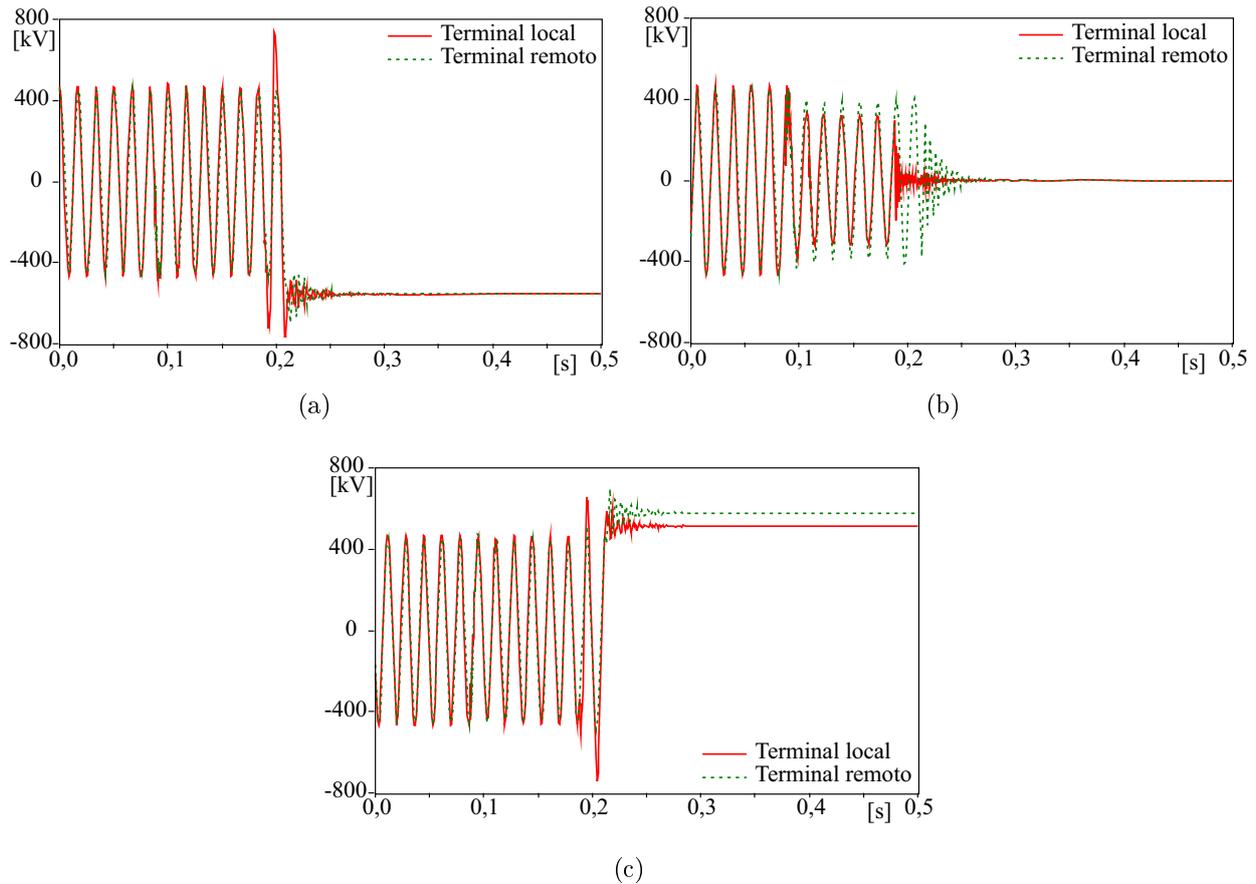


Figura 4.8. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo I com a ocorrência de uma falta fase-terra (caso 2.1.1): (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

No arranjo II, como a compensação série não é retirada de operação, a diferença da tensão vista nos terminais local e remoto é mais significativa, principalmente na fase envolvida na falta, como mostrado na Figura 4.9. Essa diferença tem um impacto direto na tensão sobre o disjuntor. Como se observa na Figura 4.10, nas fases que não estão envolvidas na falta, apesar da diferença entre os sinais de referência vistos nos terminais local e remoto, os melhores instantes para o religamento seriam os mesmos, independente do terminal da linha monitorado, e correspondem aos mínimos e máximos do sinal de referência. No entanto, no caso da fase envolvida na falta, verifica-se que os instantes mais adequados para o religamento não correspondem mais aos instantes de mínimo ou máximo, pois a carga residual, em módulo, é menor que 1,0 pu.

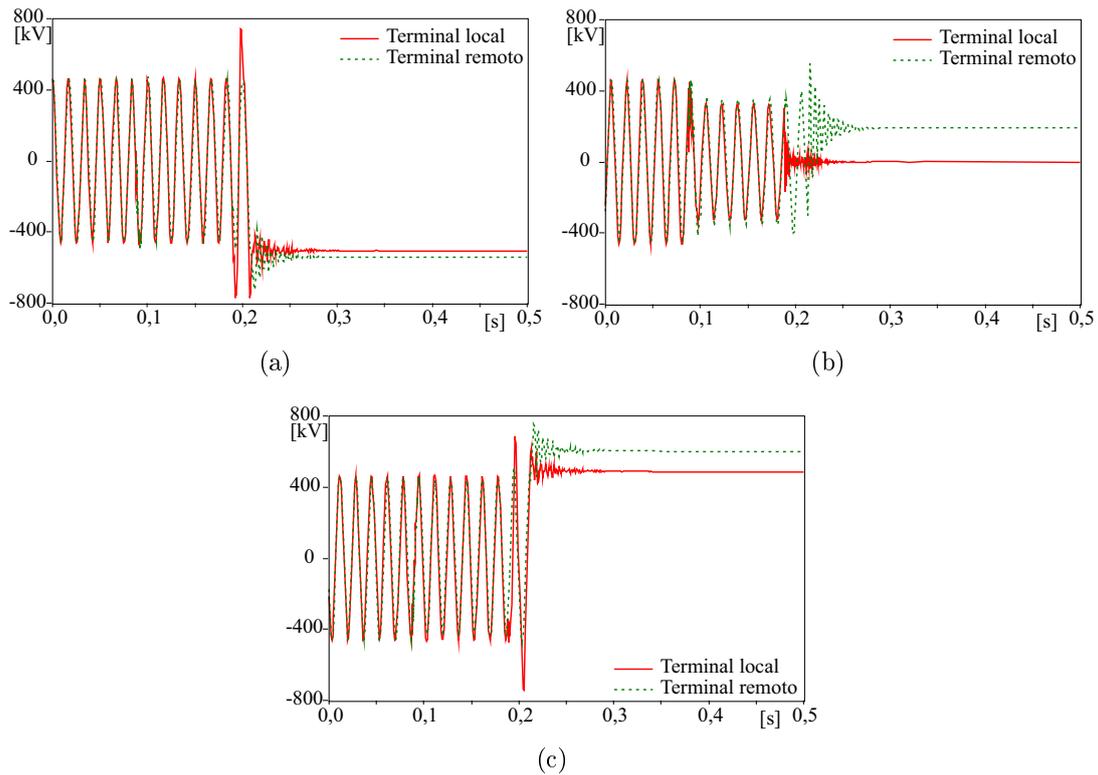


Figura 4.9. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.1: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

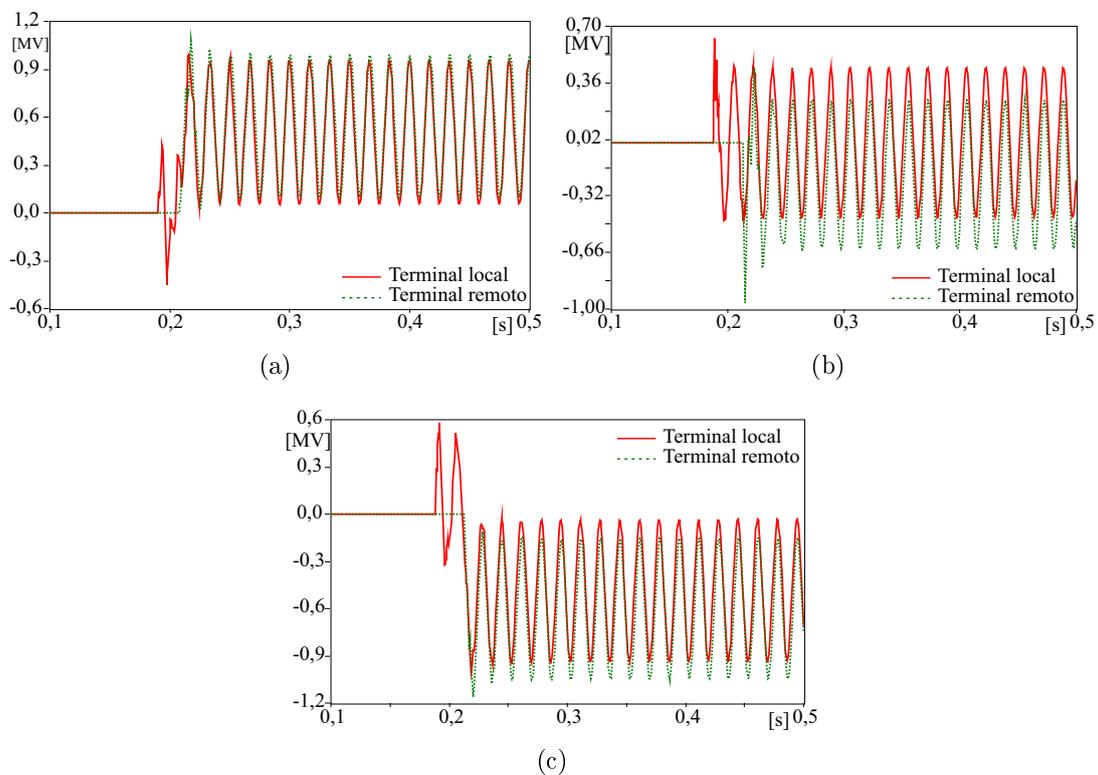


Figura 4.10. Sinais de tensão sobre o disjuntor vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.1: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Os sinais de tensão do lado da linha resultantes do caso 2.1.2 são apresentados na Figura 4.11. Neste caso, observa-se que a carga residual resultante no arranjo I é igual à carga na linha não compensada. Isto ocorre porque o BCS é completamente desviado. Já no arranjo II, apenas uma das fases envolvidas na falta (A) é desviada. Na Figura 4.12, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto. Verifica-se que nas fases em que o BCS permanece em operação (fases B e C), há uma diferença de tensão em função da queda de tensão no capacitor série.

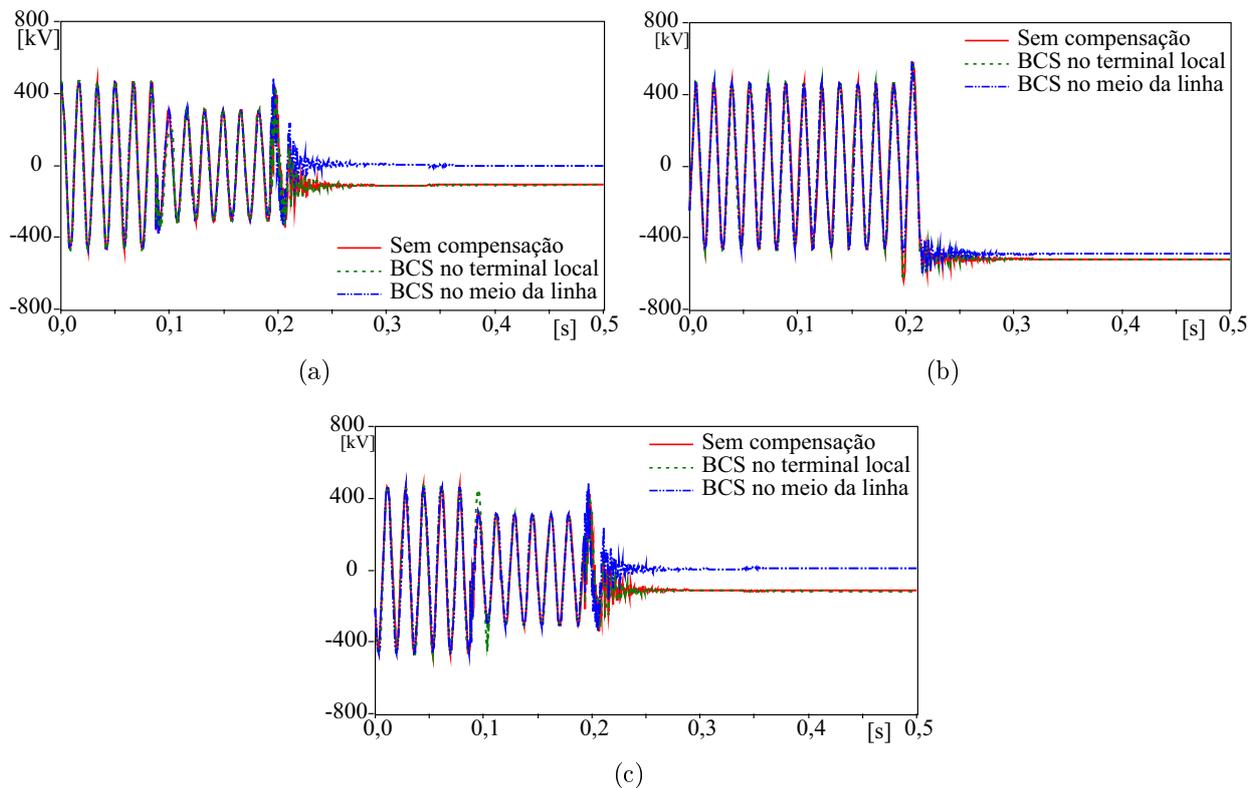


Figura 4.11. Sinais de tensão do lado da linha no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.1.2) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

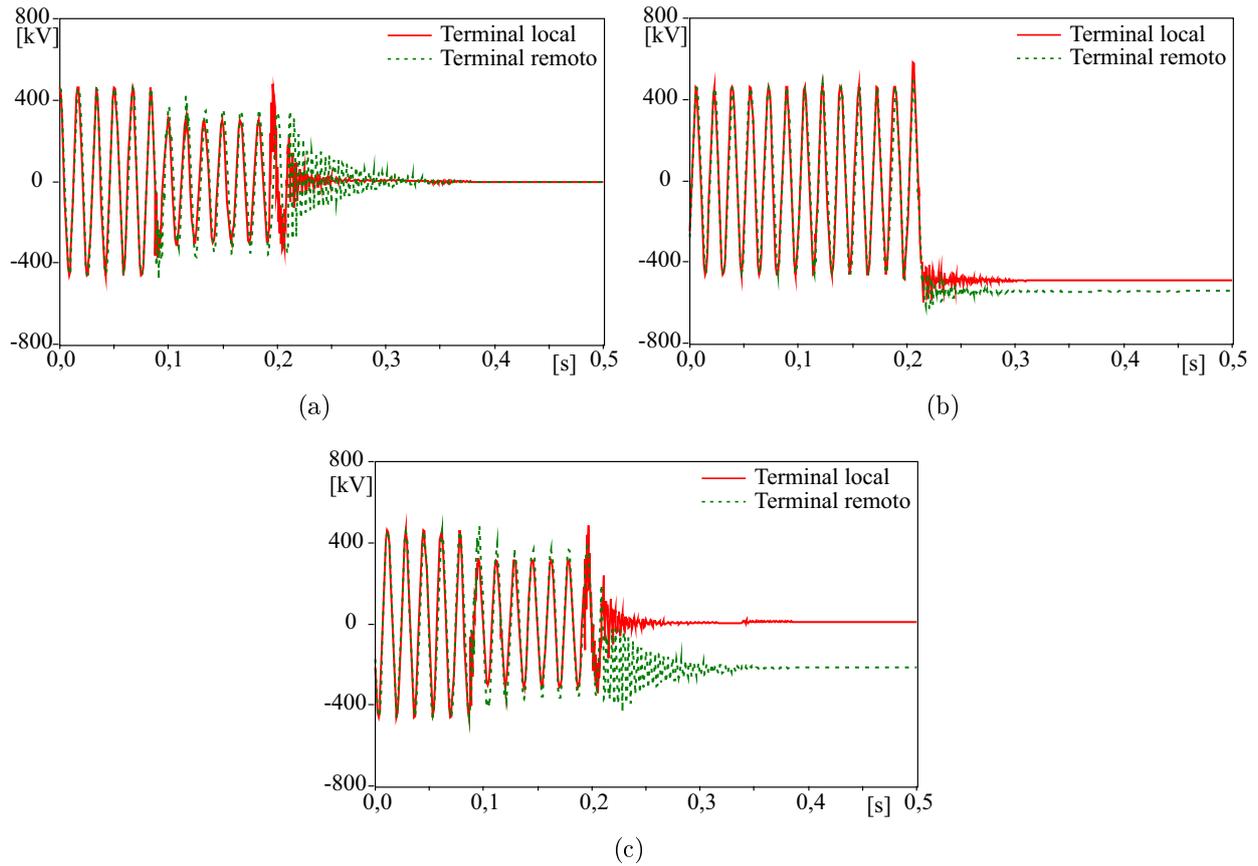


Figura 4.12. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para o arranjo II para o caso 2.1.2: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Na Figura 4.13, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha para o caso 2.1.3. Para ambos os arranjos de linha com compensação série, o BCS é retirado completamente de operação, o que pode ser identificado ao comparar com os sinais da linha sem compensação, que são iguais.

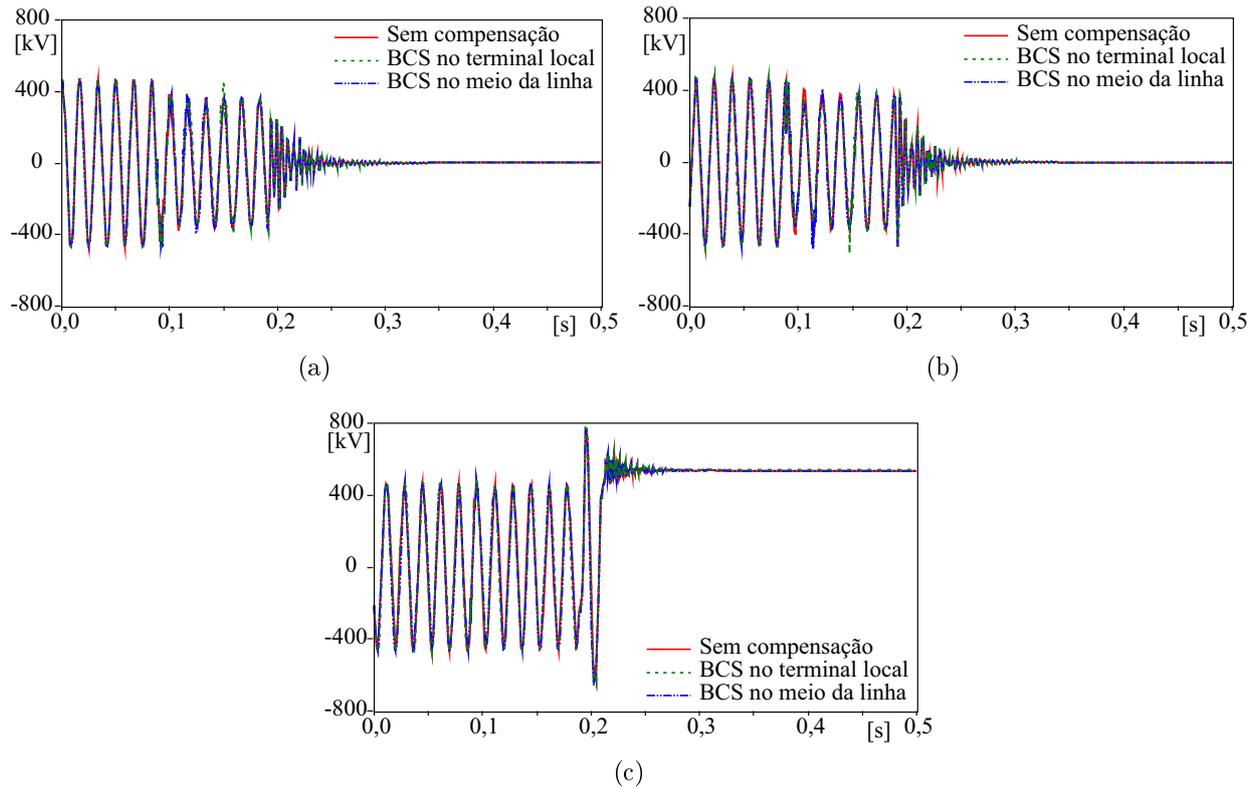


Figura 4.13. Sinais de tensão do lado da linha no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra (caso 2.1.3) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

E por fim, para o caso 2.1.4, mais uma vez se observa que os sinais resultantes nas linhas com compensação série são iguais aos da linha sem compensação como mostrado na Figura 4.14. O BCS é retirado completamente de operação nos dois arranjos avaliados.

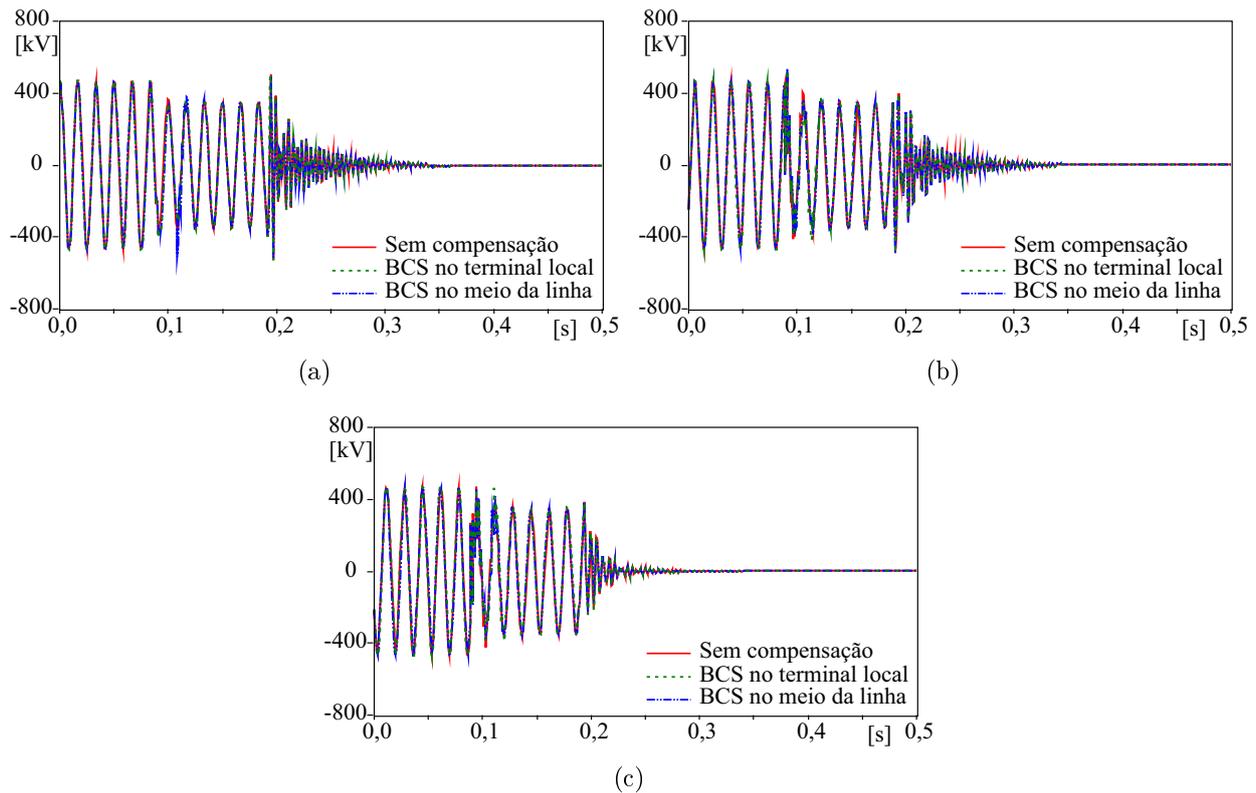


Figura 4.14. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.1.4) para linhas apenas com compensação série (arranjos I e II) e sem compensação reativa: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

4.3.2 Casos 2.2: Linhas com compensação série e shunt

Para a análise carga residual resultante da abertura trifásica devido à ocorrência de defeito em linhas com ambos os tipos de compensação reativa, os seguintes casos são apresentados neste trabalho:

- Caso 2.2.1: falta fase-terra AT a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 2.2.2: falta fase-fase CA a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 2.2.3: falta fase-fase-terra BCT a 300 km do terminal local da linha;
- Caso 2.2.4: falta fase-fase AB a 300 km do terminal local da linha.

Os casos apresentados foram selecionados dentre vários cenários avaliados contemplando as três condições de operação do BCS: permanecer em operação, ser completamente retirado ou parcialmente desviado.

Na Figura 4.15, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para o caso 2.2.1. Para os arranjos IV e V, apenas a fase envolvida na falta é desviada. Enquanto que para o arranjo VI, o BCS permanece em operação. Como se observa-se, a fase sob falta (A) apresenta uma forma de onda diferente para o arranjo VI em relação às demais configurações. Isto era esperado, pois se deve à presença do capacitor série.

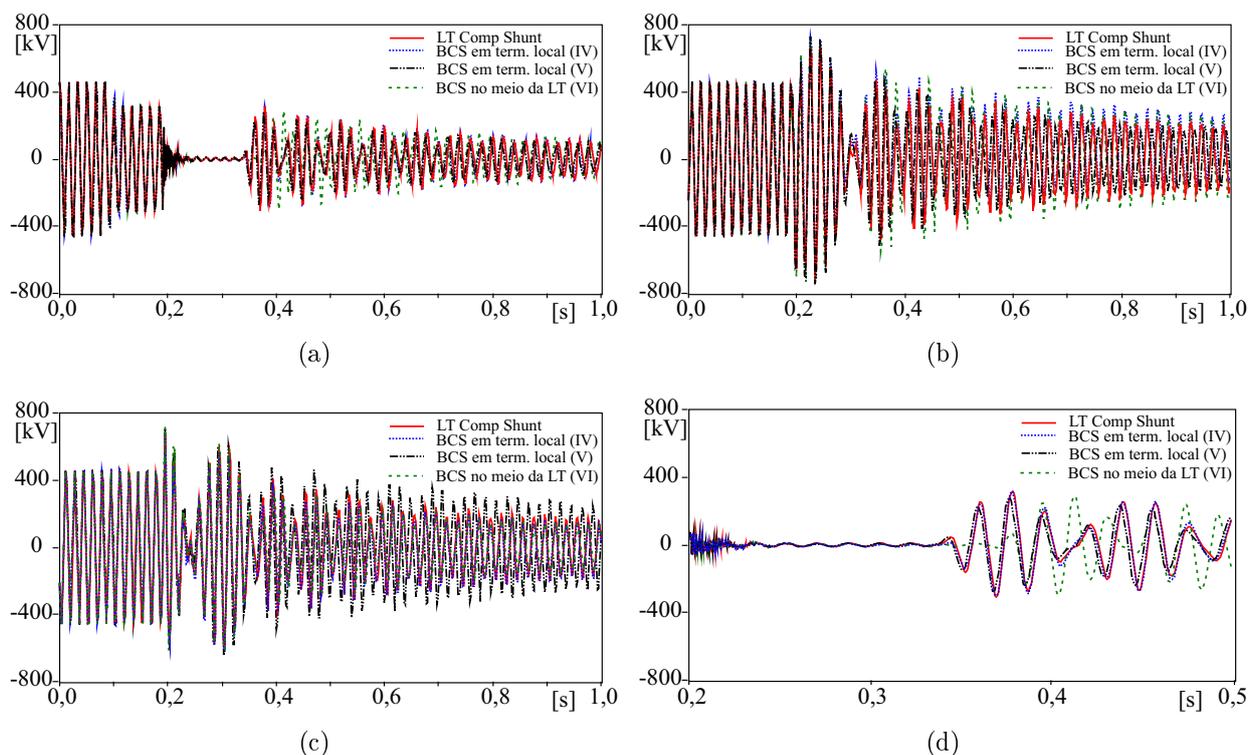


Figura 4.15. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito monofásico (caso 2.2.1) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase A.

Quando o BCS permanece em operação, devido à queda de tensão no capacitor série, a carga residual não é uniforme ao longo da linha. As tensões do lado da linha vistas nos terminais local e remoto para o arranjo VI são mostradas na Figura 4.16. Observa-se que na fase envolvida na falta, quando ocorre a abertura da linha, há uma diferença significativa entre a tensão vista no terminal local e no terminal remoto, com diferença na frequência do sinal que se deve à presença do capacitor série. No entanto, quando ocorre a extinção da falta, as tensões passam a ter basicamente as mesmas características.

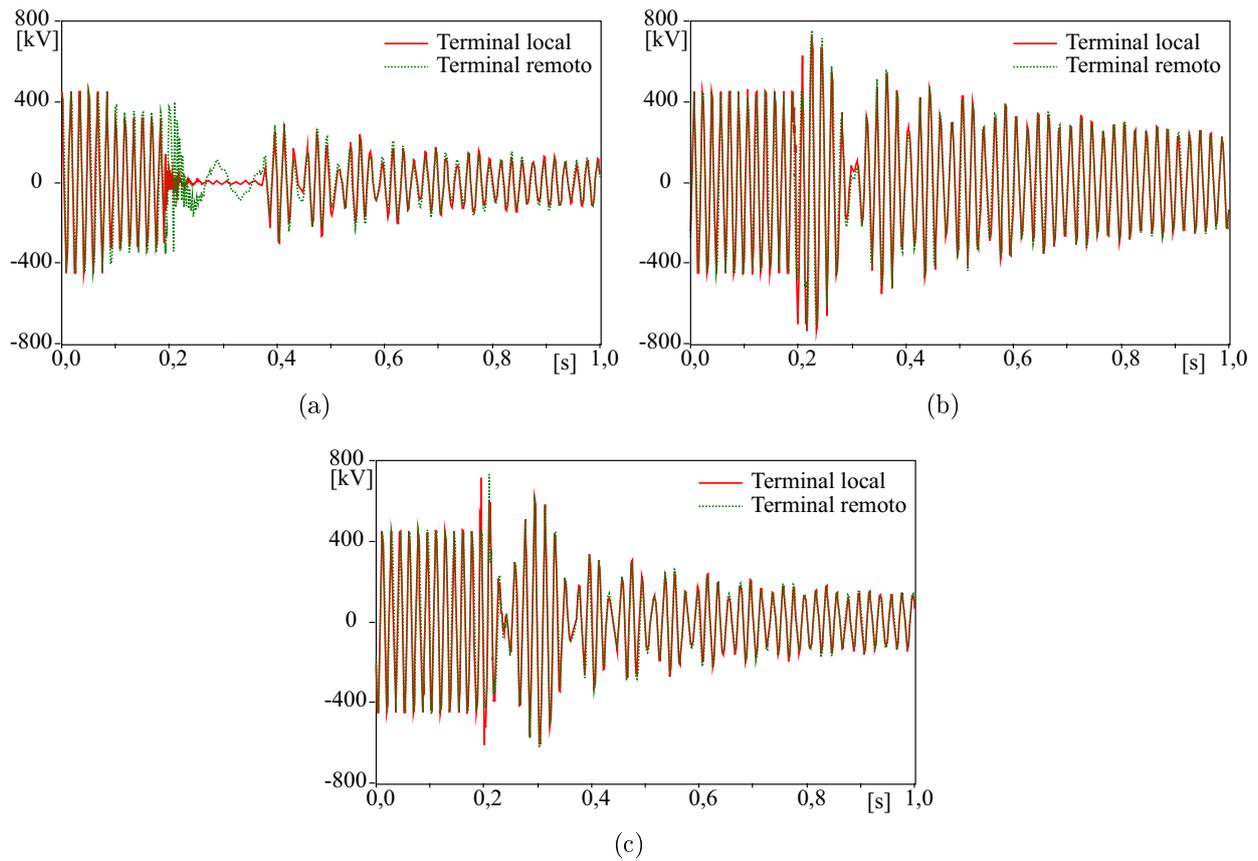


Figura 4.16. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para uma abertura trifásica com ocorrência de defeito monofásico (caso 2.2.1) para o arranjo VI: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Para o caso 2.2.2, observa-se na Figura 4.17 que todos os arranjos avaliados apresentam carga residual com as mesmas características que a carga residual da linha com compensação em derivação. Isso se deve ao fato de que em todos os arranjos a compensação série foi retirada completamente de operação devido à falta.

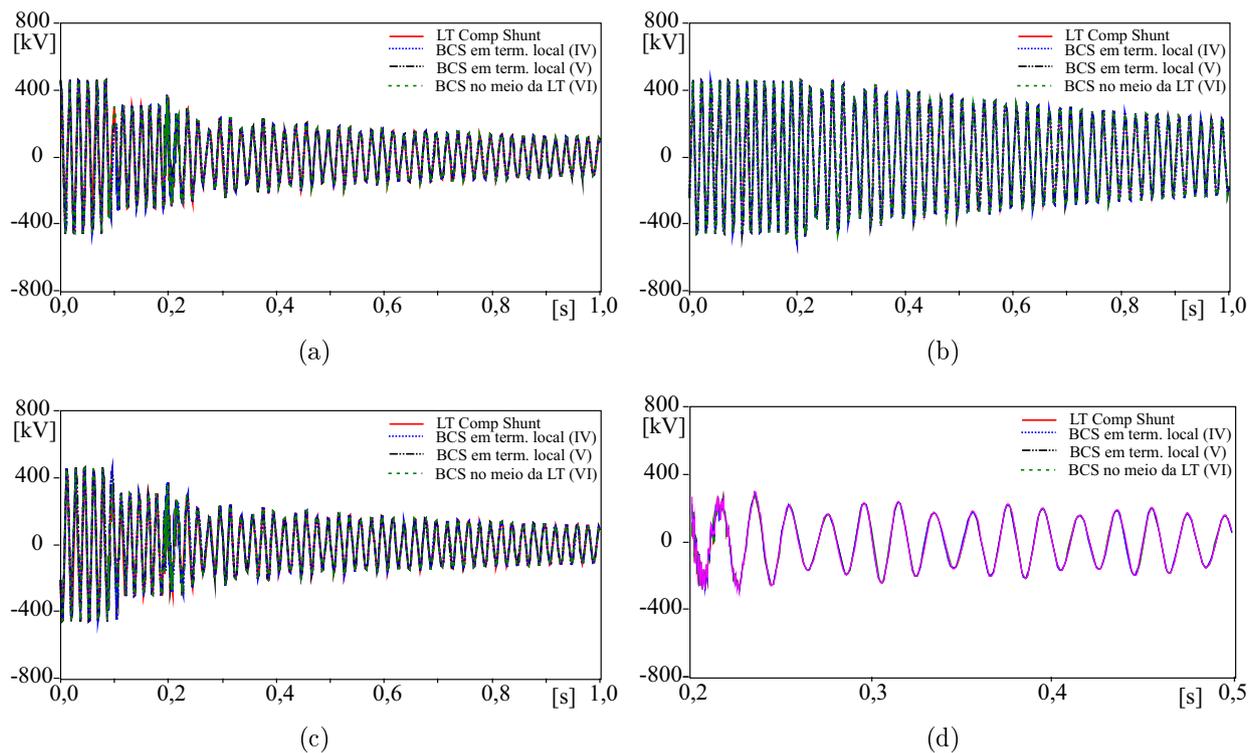


Figura 4.17. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C.

No caso 2.2.3, as cargas residuais resultantes para cada arranjo avaliado são apresentadas na Figura 4.18. Para os arranjos IV e V, o banco é retirado completamente devido à falta. Para o arranjo VI, apenas uma das fases envolvidas na falta é retirada de operação (B). Observa-se que a tensão do lado da linha na fase C desse arranjo se apresenta diferente dos demais esquemas em função da queda de tensão no capacitor série, que permanece na linha. No entanto, após a extinção da falta, o comportamento do sinal torna-se similar ao sinal dos demais arranjos. Na Figura 4.19, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha na fase C vistos nos terminais local e remoto para o arranjo VI. Nota-se que após a extinção da falta, praticamente não há diferença entre as tensões vistas no terminal local e remoto.

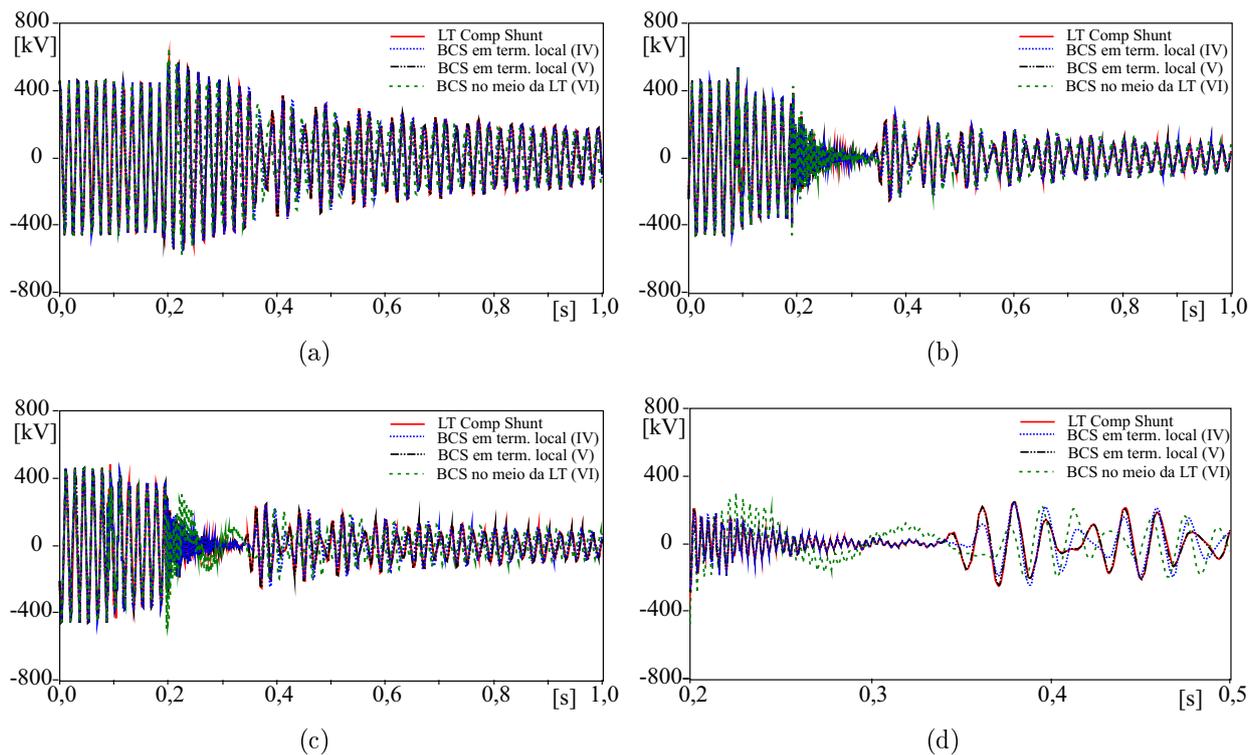


Figura 4.18. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra (caso 2.2.3) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C; (d) zoom da fase C.

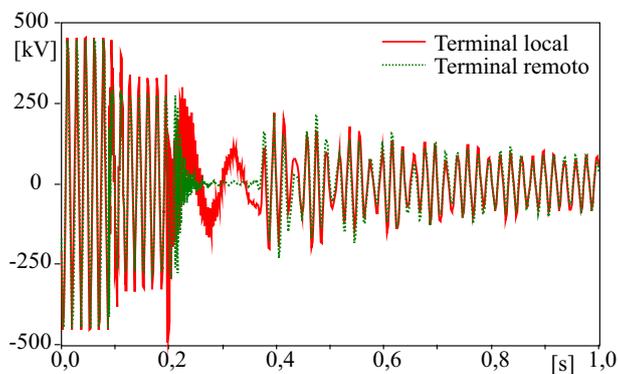


Figura 4.19. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto após abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase-terra na fase C do arranjo VI.

Os sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultantes do caso 2.2.4 são apresentados na Figura 4.20. Para esse caso, no arranjo VI, o BCS é completamente retirado de operação. No entanto, para os arranjos IV e V, o *by-pass* é parcial, de modo que apenas a fase A é retirada de operação.

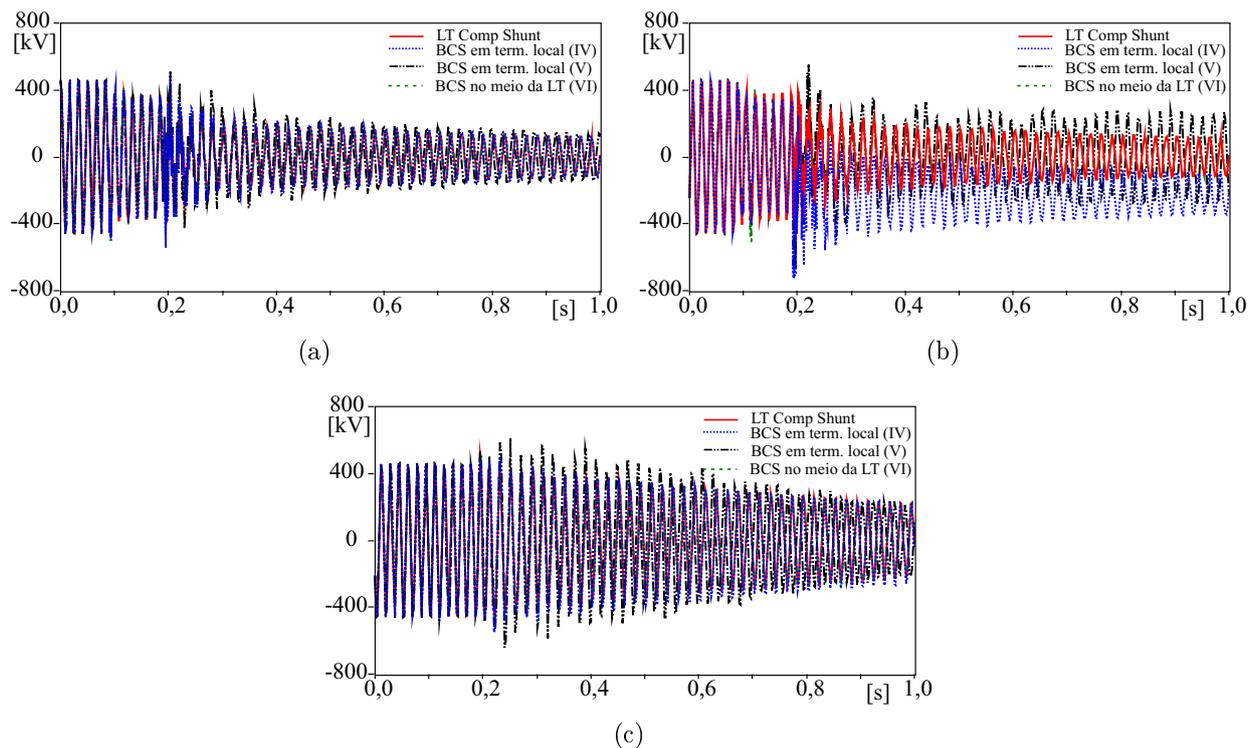


Figura 4.20. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para linhas com ambos os tipos de compensação reativa (arranjos IV, V e VI) e apenas com compensação em derivação: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Na Figura 4.21, observa-se a diferença significativa entre os sinais de tensão do lado da linha na fase B após a abertura da linha para os arranjos IV e V em relação à linha apenas com compensação em derivação. Isto se deve ao capacitor série ter permanecido em operação nesta fase para os arranjos IV e V. A fim de avaliar o impacto da presença no capacitor série quanto à distribuição da carga residual ao longo da linha, os sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto para esses dois esquemas na fase B são apresentados na Figura 4.22. A diferença mais significativa é observada para o arranjo IV.

A fim de avaliar o impacto dessa diferença de tensão ao longo da linha para o chaveamento controlado, os sinais de tensão sobre o disjuntor em ambos os terminais da linha são apresentados na Figura 4.23. Como é possível observar, mesmo no caso do arranjo IV, no qual se observa a maior diferença entre as tensões vistas nos terminais local e remoto, os instantes mais adequados para o religamento da linha estão localizados na região de menor batimento do sinal, que coincidem em ambos os terminais.

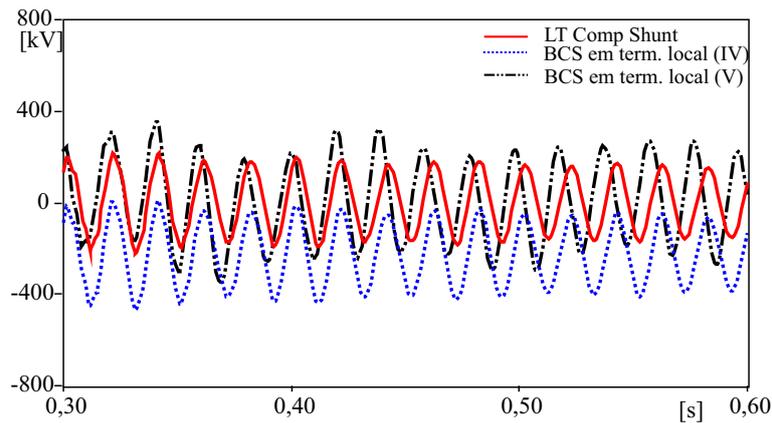


Figura 4.21. Sinal de tensão do lado da linha visto no terminal local após abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase na fase B, com destaque para os arranjos IV e V.

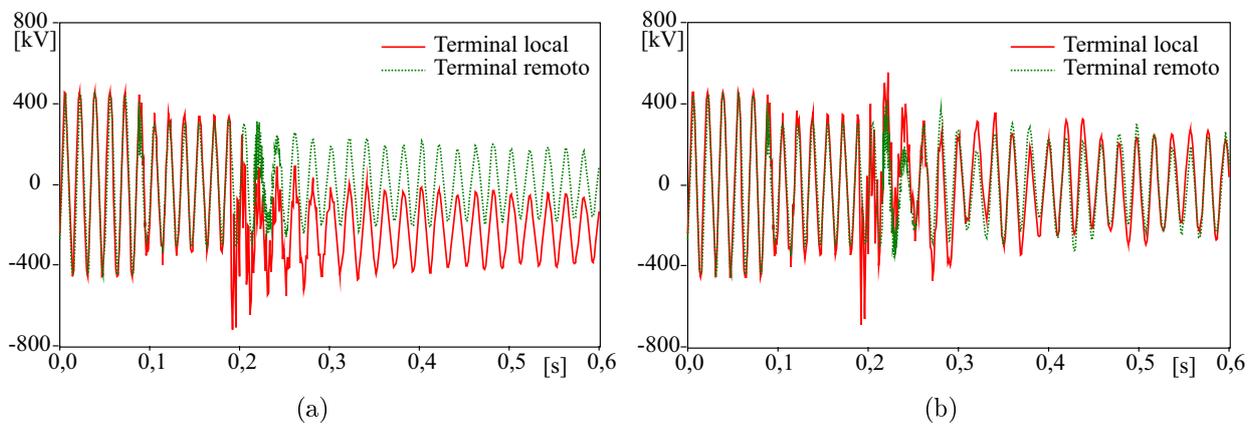


Figura 4.22. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultantes da abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para a fase B: (a) arranjo IV; (b) arranjo V.

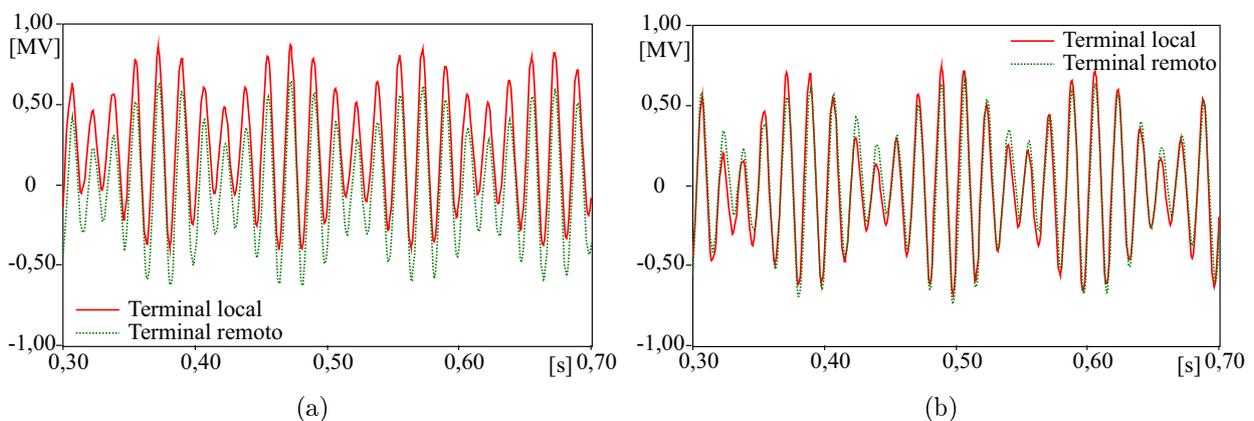


Figura 4.23. Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultantes da abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.4) para a fase B: (a) arranjo IV; (b) arranjo V.

4.4 IMPACTO DA REINSERÇÃO DO BCS ANTES DA MANOBRA DE RELIGAMENTO

De acordo com os resultados apresentados neste capítulo, verificou-se que quando a abertura da linha é causada por um defeito, o BCS pode ser retirado de operação de forma parcial ou total. Em função do grau de importância da compensação reativa série para a estabilidade do sistema, pode ser necessário uma reinserção rápida, ou seja, logo após a extinção da falta. Então, a fim de avaliar o impacto desta reinserção no comportamento da carga residual, dois casos são apresentados a seguir, um para linha apenas com compensação série e outro para linha com ambos os tipos de compensação reativa.

Para linha apenas com compensação série, foi selecionado o arranjo II para análise, que corresponde a uma linha apenas com compensação série com o BCS instalado no meio da linha. Avalia-se o impacto da reinserção do banco após a extinção de uma falta trifásica a 300 km do terminal local (caso 2.1.4), em que ocorre o *by-pass* total do banco. Na Figura 4.24, são mostrados os sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto da linha. Como se observa, os sinais das fases A e C são afetados com a reinserção do BCS, e há uma inversão de polaridade da carga residual vista nos terminais local e remoto.

No chaveamento controlado, os instantes de religamento se baseiam nos sinais de referência, que é o sinal de tensão sobre o disjuntor. Na Figura 4.25, são apresentadas as formas de onda da tensão sobre o disjuntor em ambos os terminais da linha. Então, nas fases afetadas com a reinserção do BCS, observa-se que os melhores instantes de fechamento dependem do sinal considerado como referência, isto é, se é a partir do terminal local ou remoto. No entanto, a diferença não é tão significativa. É necessário avaliar qual é o impacto no desempenho do chaveamento controlado quanto à redução das sobretensões de manobra.

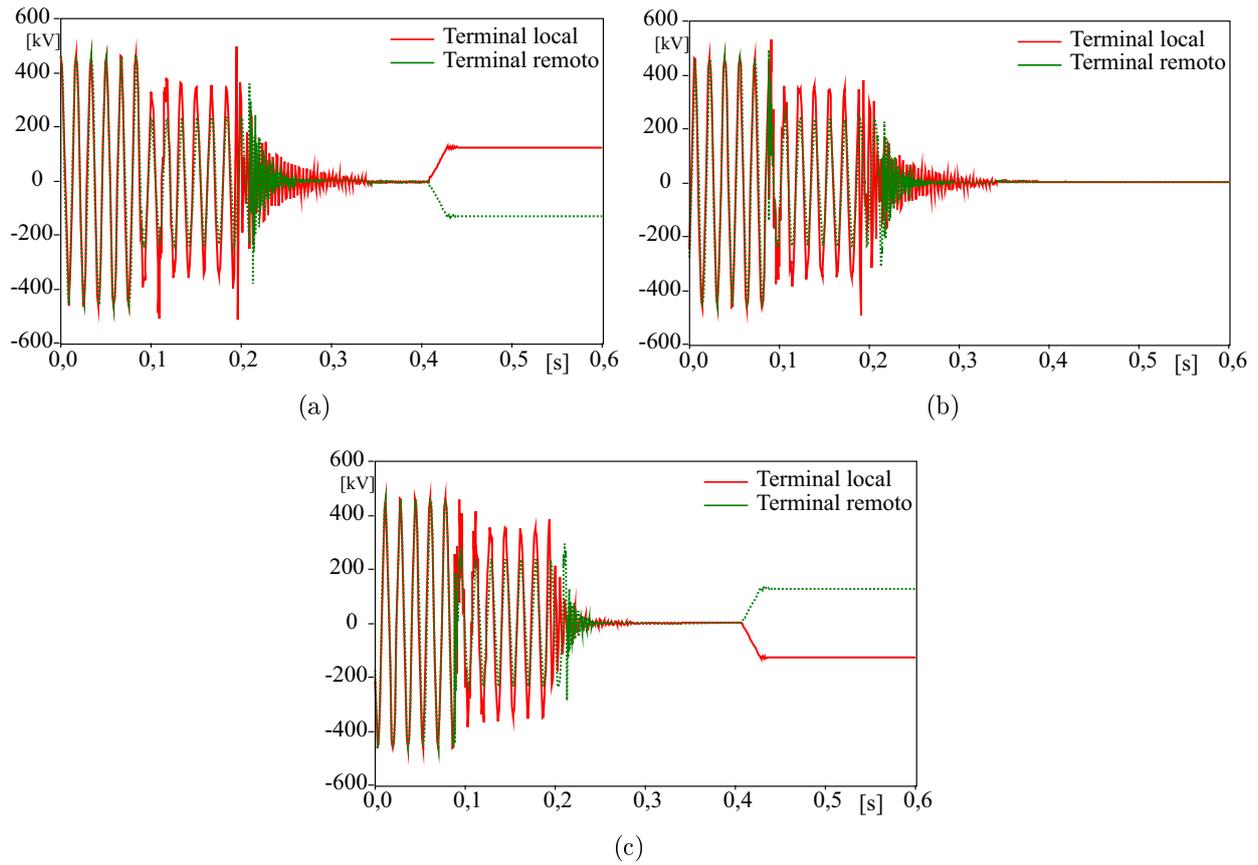


Figura 4.24. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.2.4) para o arranjo II com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

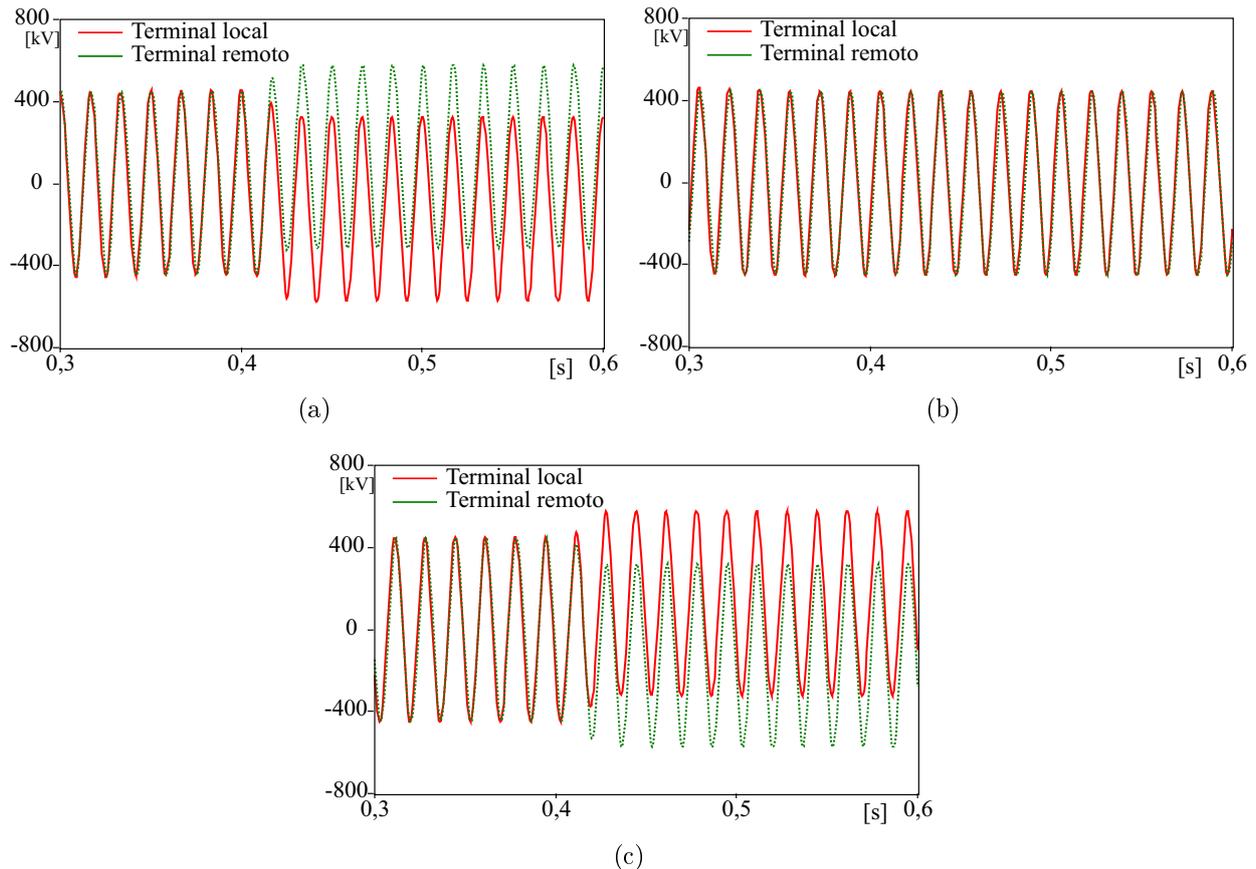


Figura 4.25. Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito trifásico (caso 2.1.4) para o arranjo II com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Para a análise em linhas com ambos os tipos de compensação reativa, considerou-se o arranjo VI. Na Figura 4.26, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para uma abertura de linha devido a uma falta fase-fase (caso 2.2.2), em que o BCS é retirado completamente devido à falta, e reinserido logo após a extinção do defeito. Observa-se que em torno de 0,4 s há uma alteração na fase A, indicando o instante de reinserção do BCS. Na Figura 4.27, é apresentado, em maior detalhe, o que ocorre quando há a reinserção do BCS. Observa-se que o maior impacto da reinserção do BCS ocorre na fase A.

Na Figura 4.28, são apresentadas as tensões sobre o disjuntor em ambos os terminais para avaliar a influência da reinserção antes do religamento da linha. Observa-se que a diferença entre os sinais dos terminais da linha não é tão significativa após a reinserção do BCS, de que modo que não deve comprometer o desempenho do chaveamento controlado quanto à redução das sobretensões.

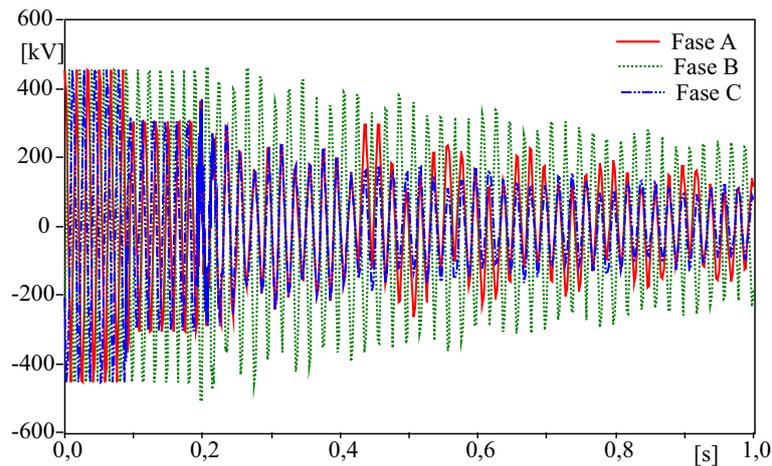


Figura 4.26. Sinais de tensão do lado da linha vistos no terminal local para a abertura de linha devido a uma falta bifásica (caso 2.2.2) para o arranjo VI, considerando a reinserção do BCS após a extinção da falta.

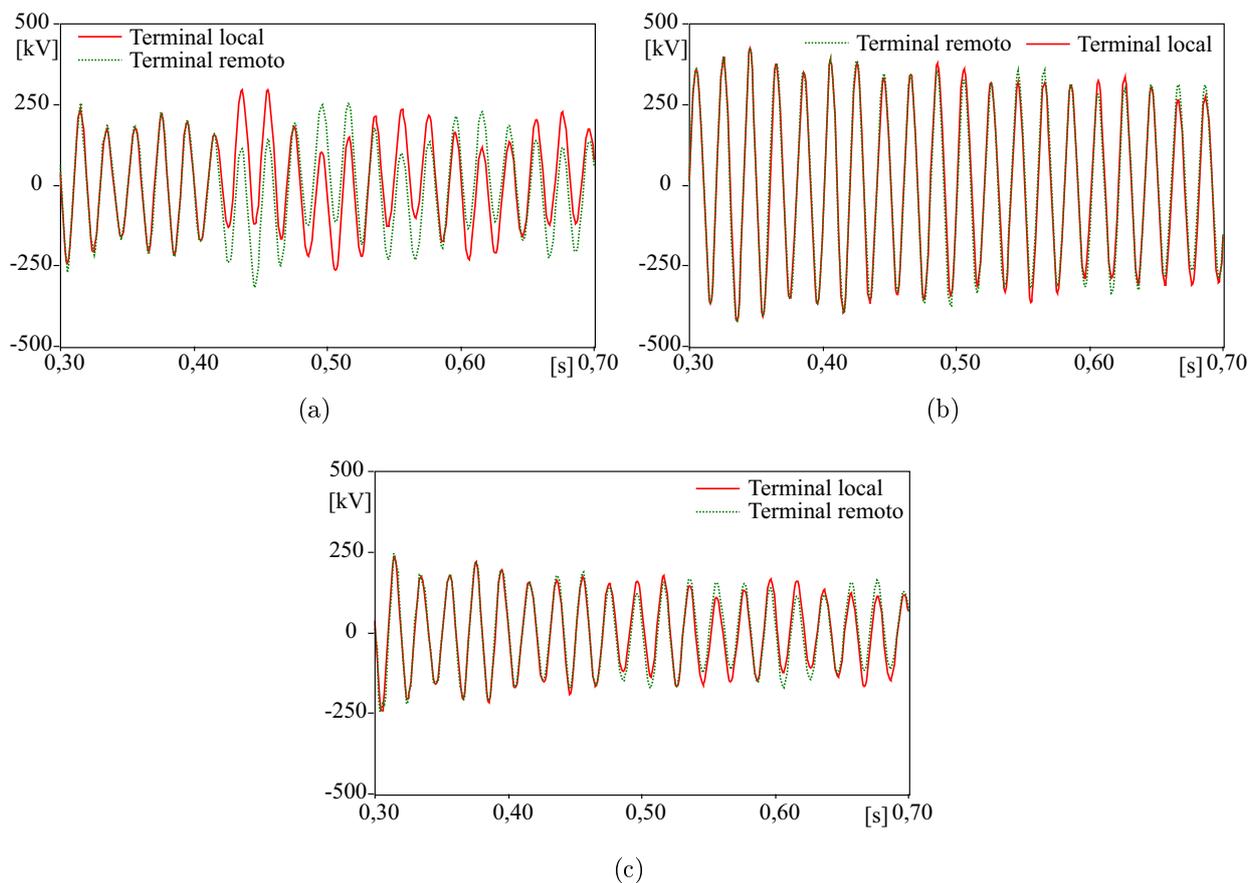


Figura 4.27. Sinais de tensão do lado da linha vistos nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para o esquema VI com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

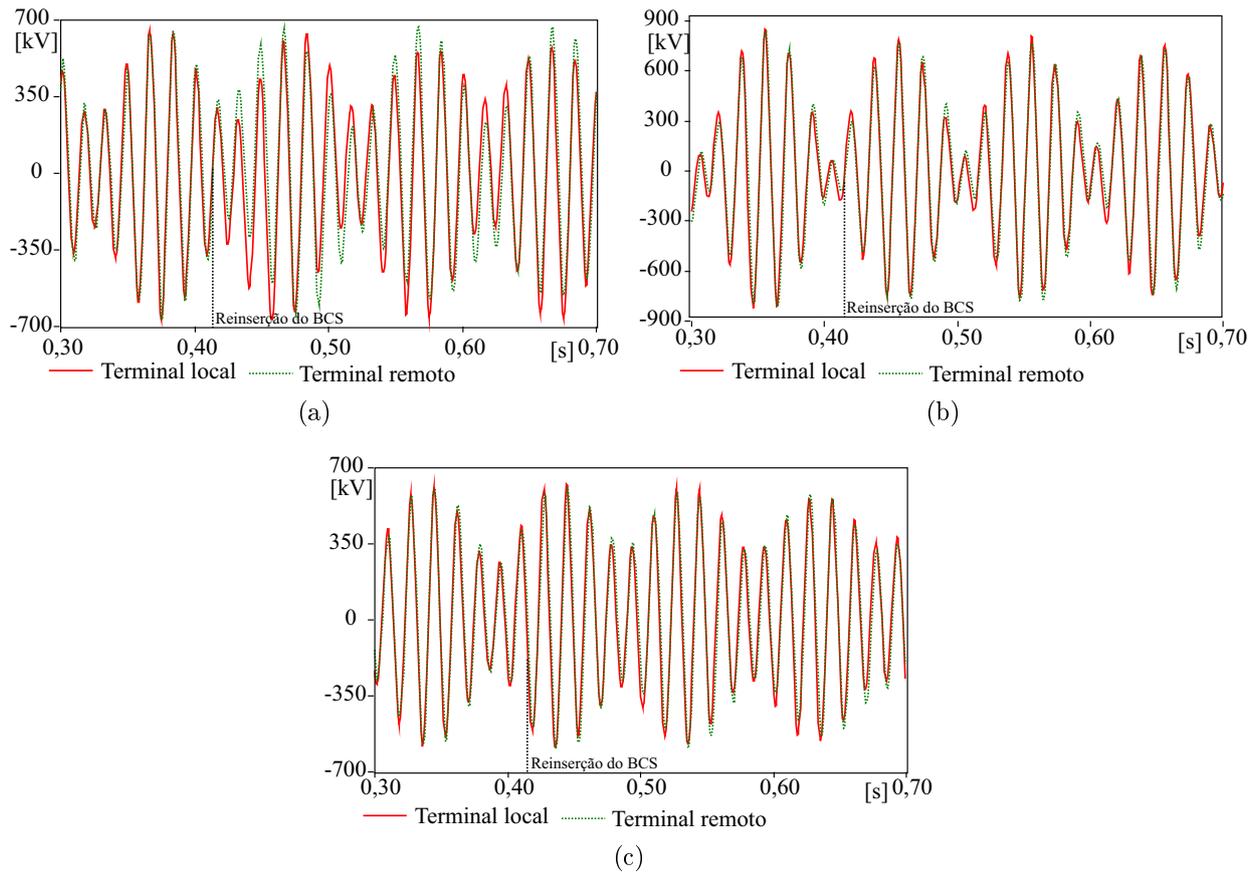


Figura 4.28. Sinais de tensão sobre o disjuntor nos terminais local e remoto resultante de uma abertura trifásica com ocorrência de defeito fase-fase (caso 2.2.2) para o arranjo VI com reinserção do BCS após a extinção da falta: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

4.5 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo, uma análise da carga residual resultante da abertura com e sem defeito de linhas com compensação série foi apresentada. Em manobras de religamento de linhas, conhecer a forma de onda da carga residual é fundamental para a aplicação do chaveamento controlado. Conforme visto no Capítulo 2, a estimação dos melhores instantes de fechamento se baseia no sinal de tensão sobre o disjuntor, ou seja, é necessário conhecer os sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte. Para linhas não compensadas e apenas com compensação reativa em derivação, a forma de onda da carga residual já é conhecida, além disso, se distribui uniformemente ao longo da linha. Para linhas com BCS, existem algumas particularidades.

A avaliação foi feita para duas condições de abertura trifásica de linha: com e sem ocorrência de defeito. Para a situação em que a abertura da linha não é causada por um defeito, verificou-

se que a carga residual em linhas apenas com compensação série se assemelha àquela observada em linhas não compensadas. Enquanto que a carga residual resultante em linhas com ambos os tipos de compensação reativa é similar a de linhas apenas com compensação em derivação. No entanto, devido à presença do capacitor série, a carga residual não se distribui uniformemente ao longo da linha como ocorre em linhas não compensadas e com compensação em derivação. Mesmo assim, a diferença entre a tensão vista no terminal local e no terminal remoto não é significativa, principalmente para as linhas com ambos os tipos de compensação reativa.

Nos casos apresentados para abertura de linha causada por uma falta, verificou-se que, nas situações em que o BCS é desviado completamente, a carga residual resultante apresenta a mesma forma de onda observada em linhas não compensadas ou apenas com compensação em derivação. Enquanto que, quando o BCS é mantido em operação, a diferença entre as tensões vistas nos terminais local e remoto é maior nas fases envolvidas na falta, principalmente para linhas apenas com compensação série.

Além disso, foi avaliado o impacto da reinserção do BCS na forma de onda da carga residual antes da manobra de religamento. Constatou-se que, em linhas apenas com compensação série, o impacto é maior, alterando a característica da carga residual, de modo que a polaridade vista em um terminal pode ser oposta à polaridade vista no outro terminal. Portanto, é importante avaliar qual é o impacto no chaveamento controlado quanto à estimação dos instantes de fechamento, e conseqüentemente, na redução das sobretensões.

Com os resultados apresentados neste capítulo, sugere-se avaliar o desempenho de técnicas de chaveamento controlado existentes para linhas não compensadas e com compensação em derivação, visto que se verificou a semelhança da forma de onda dos sinais dessas linhas com linhas com compensação série. No próximo capítulo, os métodos utilizados neste trabalho são apresentados.

MÉTODO DE CHAVEAMENTO CONTROLADO UTILIZADO PARA LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

O chaveamento controlado de linhas de transmissão tem sido estudado há vários anos, com o primeiro dispositivo testado em campo na década de 1990 (FROEHLICH *et al.*, 1997b). A partir desses estudos, constata-se a viabilidade de tal método na redução das sobretensões de manobras, com vários benefícios ao comparar com o método tradicionalmente aplicado, o qual utiliza disjuntores com RPI. Com o levantamento bibliográfico apresentado no Capítulo 3, verificou-se que a maioria das técnicas são destinadas a linhas com compensação reativa em derivação ou sem compensação. Portanto, a aplicação em linhas com compensação reativa série ainda é considerada uma aplicação não-convencional, pois existem algumas particularidades devido à presença do BCS, como as condições variáveis de operação desse equipamento, que influenciam diretamente as características da carga residual da linha. E conhecer esse sinal do lado da linha é fundamental para a aplicação do chaveamento controlado com sucesso. Então, no capítulo anterior, apresentou-se uma análise desse sinal considerando os principais arranjos de linhas com BCS, além das condições de abertura da linha.

De acordo com os resultados apresentados, verificou-se que, no caso da abertura da linha sem defeito, como o BCS permanece em operação, a distribuição da carga residual ao longo da linha não é uniforme como ocorre em linhas com reatores em derivação ou sem compensação reativa devido à queda de tensão no capacitor série. No entanto, como não há defeito na linha, a diferença entre as tensões do lado da linha vistas nos terminais local e remoto não é significativa, principalmente em linhas com ambos os tipos de compensação reativa. Portanto, a forma de onda da carga residual em linhas apenas com compensação série se assemelha à forma de onda em linhas não compensadas. Enquanto que em linhas com ambos os tipos de compensação reativa, a forma de onda da carga residual é semelhante a de linhas apenas com compensação em derivação. Devido às similaridades observadas, propõe-se avaliar o desempenho de técnicas

existentes aplicadas em linhas sem compensação e com compensação em derivação em linhas apenas com compensação série e com ambos os tipos de compensação, respectivamente. O método selecionado para essa avaliação é apresentado em (DANTAS *et al.*, 2008), cuja escolha foi motivada pela simplicidade das técnicas empregadas.

No caso da abertura de linha causada por um defeito, verificou-se que o BCS pode ser mantido em operação, ou retirado de forma parcial ou total, a depender das condições de falta e do ajuste da proteção do BCS. Se ocorre o *by-pass* total do banco, a forma de onda da carga residual já é conhecida, pois, linhas apenas com compensação série tornam-se linhas sem compensação reativa, e linhas com ambos os tipos de compensação tornam-se linhas apenas com compensação em derivação. Quando não há o *by-pass* do banco, ou este é parcial, observou-se que, nas linhas apenas com compensação série, a distribuição da carga residual não-uniforme é mais acentuada devido à ocorrência do defeito. E em linhas com ambos os tipos de compensação reativa, a diferença entre as tensões do lado da linha vistas nos terminais local e remoto não é significativa, bastante semelhante a de linhas apenas com compensação em derivação, com algumas diferenças devido ao arranjo do BCS e dos reatores em derivação.

Neste trabalho, a avaliação do desempenho do chaveamento controlado em linhas com ambos os tipos de compensação reativa é feita a partir da aplicação de um método destinado a linhas com compensação em derivação (DANTAS *et al.*, 2014). Trata-se de um método que emprega as técnicas apresentadas em Dantas *et al.* (2008), porém, com uma abordagem adequada para os casos com defeito. O método foi selecionado devido à simplicidade das técnicas, e por ser apropriado para os casos sob defeito. Para linhas apenas com compensação série, como a carga residual pode apresentar um valor, em módulo, menor que 1,0 pu, é proposto um método para a estimação dos melhores instantes de fechamento, que se baseia nas técnicas apresentadas em Dantas *et al.* (2008) para linhas sem compensação e na estimação da carga residual. Para isto, é necessário corrigir a tensão secundária do TPC como um filtro digital recursivo como será apresentado neste capítulo.

A seguir, os métodos utilizados neste trabalho são apresentados, bem como a solução apresentada para linhas apenas com compensação série que proporciona uma melhoria na estimação dos instantes de religamento.

5.1 TÉCNICAS DE CHAVEAMENTO CONTROLADO UTILIZADAS

Os métodos utilizados neste trabalho para avaliar o desempenho do chaveamento controlado em linhas com compensação série são apresentados em Dantas *et al.* (2008), Dantas *et al.* (2014). Tratam-se de técnicas aplicadas a manobras de energização e religamento de linhas de transmissão, que se baseiam na estimação de sinais de referência em instantes futuros para calcular um conjunto de possíveis instantes ótimos, que são os instantes de passagem pelo zero do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor, para a realização da manobra. Uma vantagem desses métodos é que empregam técnicas simples para a estimação dos sinais, e a definição dos melhores instantes para cada fase é feita com o propósito de reduzir o erro causado pelo efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases.

Na Figura 5.1, apresenta-se um fluxograma com as etapas das técnicas de chaveamento controlado utilizadas neste trabalho, que são as seguintes:

1. Filtragem e amostragem dos sinais de referência;
2. Detecção de zeros ou polaridades;
3. Estimação dos sinais de referência;
4. Cálculo dos instantes ótimos;
5. Lógica do controlador.

É importante destacar que os sinais de referência dependem do tipo de manobra e das condições de operação da linha de transmissão. A seguir é feita uma descrição de cada uma dessas etapas para manobras de religamento, as quais são o foco deste trabalho.

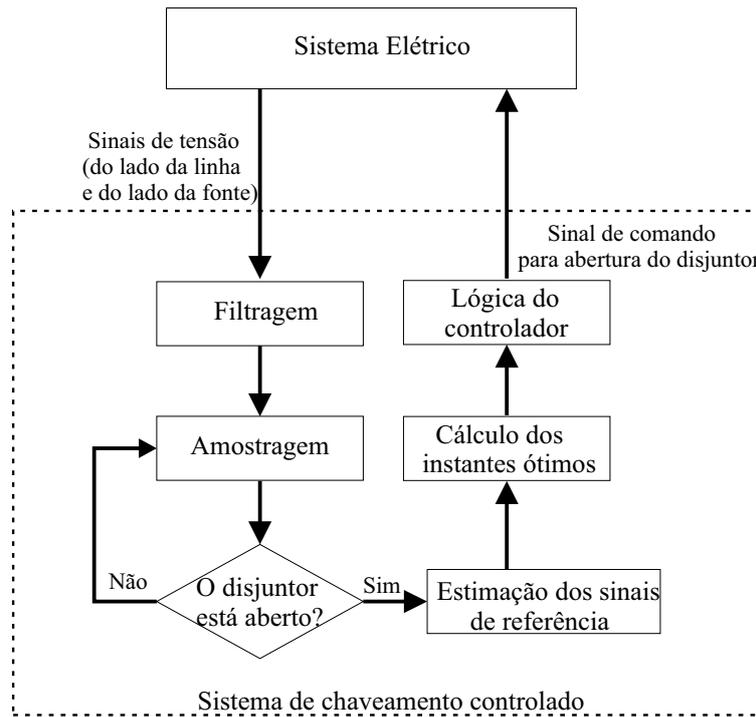


Figura 5.1. Fluxograma da técnica de chaveamento controlado utilizada neste trabalho.

5.1.1 Filtragem e Amostragem

A primeira etapa do método consiste na filtragem dos sinais de referência, os quais são obtidos do sistema elétrico. Em manobras de religamento, devido à presença da carga residual, os sinais de referência adotados são os sinais de tensão do lado da fonte e do lado linha. A opção por lidar com os sinais separadamente em vez de tratar o sinal sobre o disjuntor é feita por questões de simplicidade, pois este pode apresentar uma forma de onda complexa.

A filtragem é realizada a fim de eliminar as componentes de alta frequência que podem surgir com a manobra de chaveamento. Para isto, é utilizado um filtro Butterworth passa-baixas de terceira ordem com frequência de corte de 187,89 Hz, cuja função de transferência é dada por:

$$H(s) = \frac{1,645 \cdot 10^9}{s^3 + 2361s^2 + 2,787 \cdot 10^6s + 1,645 \cdot 10^9}. \quad (5.1)$$

Em seguida, os sinais filtrados são amostrados. A frequência de amostragem adotada é de 960 Hz, que corresponde a 16 amostras por ciclo de 60 Hz. Com essa taxa de amostragem, é possível realizar a estimação dos sinais em instantes futuros sem grandes erros, pois a frequência

está de acordo com o Teorema de Nyquist, ou seja, é maior que o dobro da maior frequência contida no sinal filtrado, evitando erro de *aliasing*.

5.1.2 Detecção de Zeros ou Polaridades

A detecção de zeros dos sinais de referência filtrados e amostrados é fundamental para a estimação desses sinais em instantes futuros. No momento em que há a desenergização da linha de transmissão, deve-se iniciar a detecção de passagens por zero dos sinais de tensão do lado da fonte e do lado da linha para manobras de religamento de linhas com compensação reativa em derivação, ou da polaridade da carga residual do lado da linha para manobras de religamento de linhas sem compensação reativa.

Os zeros são detectados quando duas amostras consecutivas possuem polaridades distintas. Com isto, é possível determinar o período do sinal, já que o intervalo entre dois zeros consecutivos corresponde a meio período do sinal. A amplitude corresponde ao valor de pico detectado entre estes dois zeros consecutivos. E para o religamento sem compensação reativa, a polaridade da carga é detectada a partir da verificação do sinal de tensão do lado da linha.

5.1.3 Estimação dos Sinais

A determinação do período e da amplitude dos sinais de referência é feita continuamente, até que seja dado o comando de fechamento dos contatos do disjuntor. Neste momento, os sinais de referência são estimados em instantes futuros a partir dos últimos dados registrados, o que inclui a última passagem por zero, a amplitude e o período do sinal. O primeiro instante futuro leva em consideração o tempo de operação do disjuntor.

No esquema apresentado na Figura 5.2 é ilustrada como é feita a estimação do sinal de referência. No momento em que é dado o comando para a operação do disjuntor, $t_{comando}$, a última passagem por zero, t_{zero2} , torna-se a referência para o sinal a ser estimado. Deste modo, tendo A como a amplitude do sinal e T_{sr} como meio período do mesmo, o sinal estimado após o tempo de operação do disjuntor, T_{operao} , é dado por:

$$s_{estimado}(t) = A \text{sen}(\omega_{sr}(t + \Delta T)), \tag{5.2}$$

em que $\omega_{sr} = \pi/T$ e,

$$\Delta T = T_{operao} + (t_{comando} - t_{zero2}). \tag{5.3}$$

Com isto, o primeiro instante estimado do sinal de referência corresponde ao instante $t_{estimado}$ indicado na Figura 5.2.

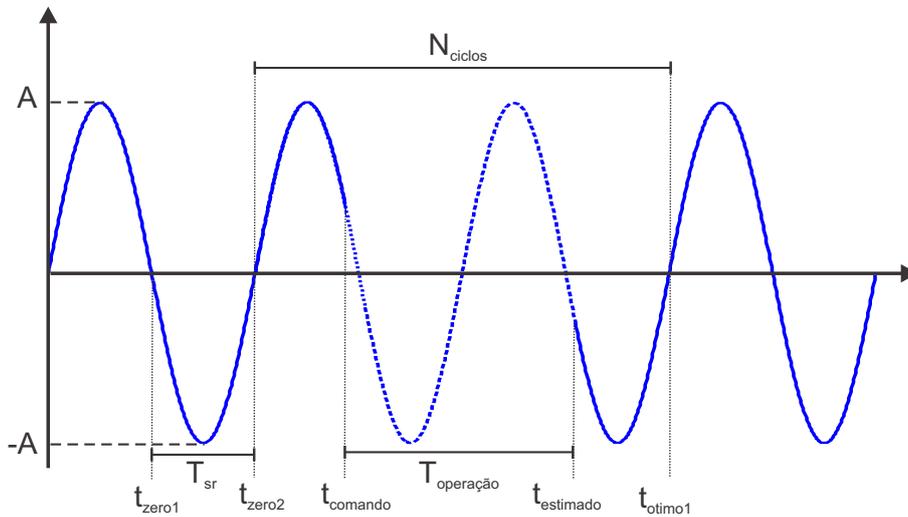


Figura 5.2. Estimação do sinal de referência.

Para manobras de religamento devido a uma abertura de linha com defeito, a etapa de estimação do sinal de tensão do lado da linha é um pouco diferente. A fim de lidar apenas com sinais senoidais, as componentes de fase da carga residual (v_a, v_b, v_c) podem ser dadas em função das componentes modais (v_{m0}, v_{m1}, v_{m2}) a partir da aplicação da matriz de Karrenbauer:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{m0} \\ v_{m1} \\ v_{m2} \end{bmatrix}. \tag{5.4}$$

Com isso, estimam-se as componentes modais, que são os sinais senoidais dados a partir das componentes de fase:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_1 \\ v_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (5.5)$$

5.1.4 Cálculo dos Instantes Ótimos para Linhas sem Compensação Reativa: Método Proposto

Em manobras de religamento de linhas sem compensação reativa, o melhor instante para fechamento do disjuntor se situa nos picos do sinal, sendo negativo ou positivo, dependendo da polaridade da carga residual. Então, para polaridade positiva, o primeiro instante ótimo é dado pela equação 5.6, e para polaridade negativa, pela equação 5.7, dadas a seguir:

$$t_{otimo1} = t_{zero2} + 2T_{sr}(N_{ciclos} + 1/4), \quad (5.6)$$

$$t_{otimo1} = t_{zero2} + 2T_{sr}(N_{ciclos} + 3/4). \quad (5.7)$$

Os próximos instantes ótimos se repetirão a cada período do sinal de referência.

No entanto, esses instantes correspondem aos melhores instantes de religamento no caso da abertura não ter sido causada por um defeito. Conforme apresentado no Capítulo 4, nos casos de abertura de linhas apenas com compensação série devido a uma falta, a carga residual resultante, em módulo, pode ser menor que 1,0 pu. Portanto, nesses casos, os instantes mais adequados para realizar a manobra não correspondem aos instantes de mínimo ou máximo do sinal de tensão sobre o disjuntor.

Neste trabalho, é proposto um novo método para estes casos. No Capítulo 4, ao avaliar o caso de uma falta fase-fase BT a 100 km do terminal local para o arranjo com um BCS no meio da linha, verificou-se que para a fase envolvida na falta, a carga residual é menor que 1,0 pu. Sendo assim, ao avaliar o sinal de referência (ver Figura 4.10), observa-se que os instantes de passagem por zero naquela fase não correspondem aos instantes de mínimo ou máximo do sinal.

Na Figura 5.3, os sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte são ilustrados para

um caso em que a carga residual é menor que 1,0 pu, tanto para uma carga com polaridade positiva quanto negativa. Conforme se observa, os instantes de passagem por zero do sinal de referência, que é a tensão entre os contatos do disjuntor, são diferentes dos instantes de mínimo ou máximo do sinal. O instante t_{otimo1} corresponde ao instante de passagem por zero do sinal de tensão do lado da fonte, t_{zero} , somado ao intervalo de tempo Δt_{ot} .

O cálculo do intervalo de tempo Δt_{ot} depende do valor da carga residual e do período do sinal de tensão do lado da fonte, estimado a partir da seguinte equação:

$$\Delta t_{ot} = \frac{\text{sen}^{-1}(V_{respu}) \cdot 2 \cdot T_{sr}}{360}, \quad (5.8)$$

em que V_{respu} é o valor estimado da tensão do lado da linha em pu, enquanto que T_{sr} é o valor estimado de meio período do sinal de tensão do lado da fonte, como mencionado anteriormente. Com isto, os primeiros melhores instantes para fechamento, dependendo da polaridade da carga residual, se é positiva ou negativa, são dados por:

$$t_{otimo1} = t_{zero} + 2T_{sr}(N_{ciclos}) + \Delta t_{ot}, \quad (5.9)$$

$$t_{otimo2} = t_{zero} + 2T_{sr}(N_{ciclos} + 1/2) + \Delta t_{ot}. \quad (5.10)$$

Sendo assim, quando a carga residual resultante em linhas apenas com compensação série apresenta valor, em módulo, $\geq 1,0$ pu, as equações 5.6 e 5.7 são utilizadas. Caso contrário, as equações 5.9 e 5.10 são empregadas. É importante destacar que para aplicar a solução apresentada, não basta conhecer a polaridade da carga residual, mas é necessário estimar o seu valor. O transformador de potencial capacitivo (TPC), que é utilizado para medição de tensão em sistemas em EAT e UAT, não reproduz tensões contínuas. Portanto, no caso de linhas sem compensação reativa ou linhas apenas com compensação série, não é possível medir a tensão do lado da linha após a sua abertura. Então, para viabilizar o uso das equações 5.9 e 5.10, é proposto o uso de um filtro digital na saída do TPC (MACHADO, 2013), com o objetivo de corrigir as distorções na tensão secundária. Na seção 5.3 deste capítulo, é apresentado o filtro utilizado neste trabalho.

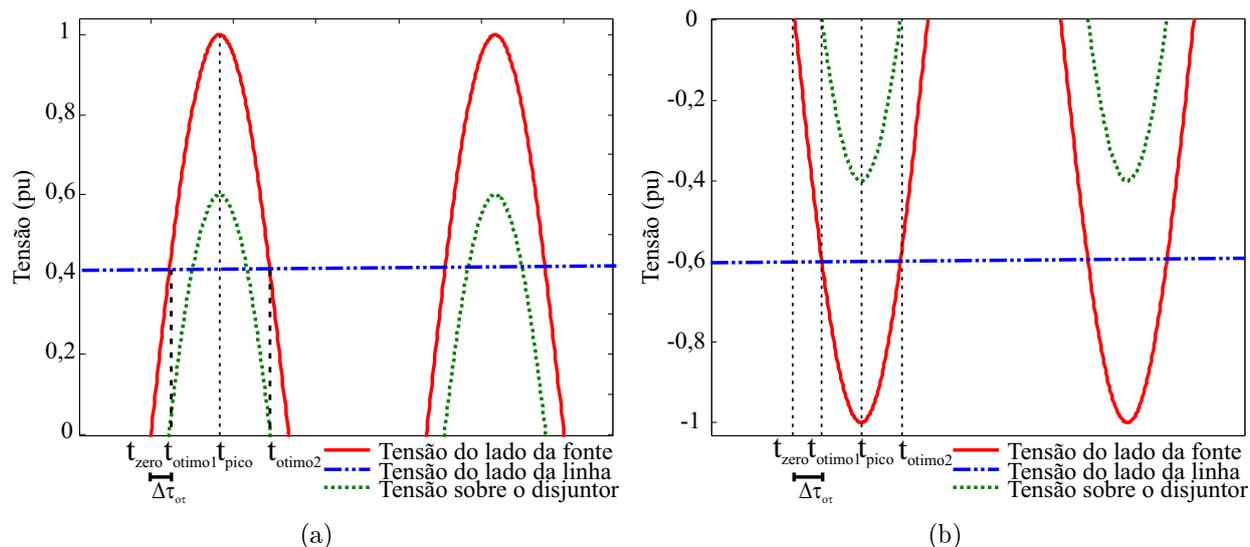


Figura 5.3. Instantes adequados para o religamento em linhas apenas com compensação série quando a carga residual é menor que 1,0 pu: (a) polaridade positiva; (b) polaridade negativa.

5.1.5 Cálculo dos Instantes Ótimos - Linhas com Compensação em Derivação

Para as manobras de religamento de linhas com compensação reativa em derivação, o cálculo dos instantes de operação do disjuntor é um pouco mais complexo devido ao caráter oscilatório da carga residual. Nestas manobras, os sinais de referência são os sinais de tensão do lado da fonte e do lado da linha, que são tratados individualmente, estimando-os em instantes futuros. Após a estimação dos sinais, estes são analisados em conjunto, de modo que os instantes ótimos correspondem aos instantes de cruzamento dos sinais cujas respectivas derivadas tenham o mesmo sinal. Isto garantirá que o instante se encontra na região de menor pulsação do sinal de tensão sobre o disjuntor. Na Figura 5.4, é ilustrado o procedimento descrito. Observa-se que há vários instantes de cruzamento entre os sinais de referência estimados, que correspondem às passagens por zero do sinal de tensão sobre o disjuntor. No entanto, apenas um desses instantes, t_{cruz4} , corresponde a um instante ótimo, pois ocorre na região de menor batimento do sinal de tensão entre os contatos do disjuntor, como pode ser visto na Figura 5.4.

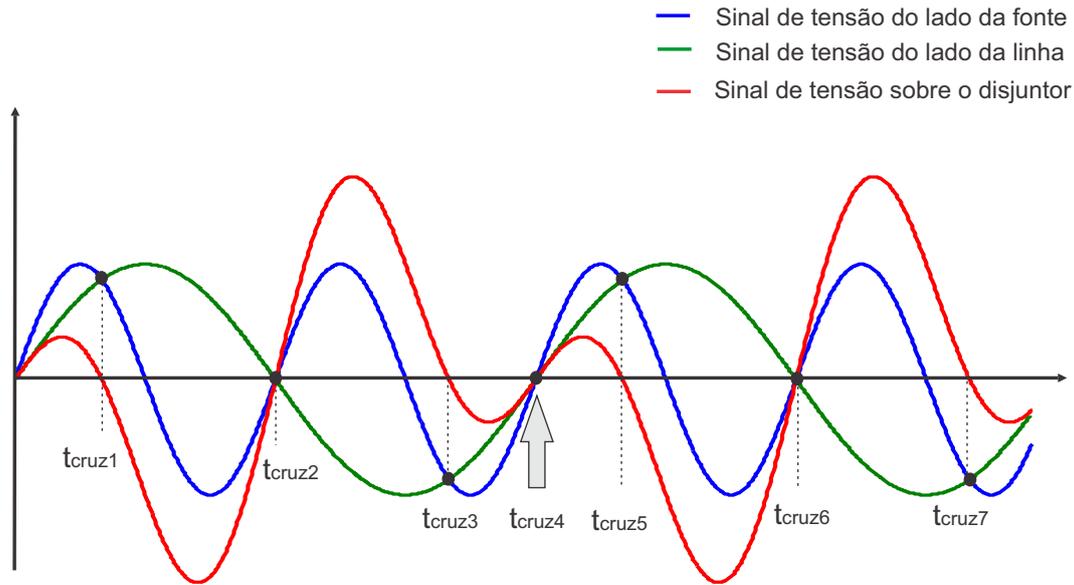


Figura 5.4. Determinação dos instantes ótimos em uma manobra de religamento de linha com compensação reativa em derivação.

5.1.6 Lógica do Controlador

Para cada fase, tem-se um conjunto de possíveis instantes de fechamento do disjuntor, calculados conforme mostrado na subseção anterior. Com esta informação, a lógica do controlador consiste em atrasar o instante de comando, $t_{comando}$, que é dado aleatoriamente, de modo que o chaveamento seja efetuado em um instante ótimo, t_{otimo} , e que o intervalo entre o instante de fechamento da última fase em relação à primeira seja o menor possível, garantindo a redução do efeito do acoplamento eletromagnético entre as fases. Portanto, o tempo de atraso necessário é dado por:

$$T_{atraso} = (t_{otimo} - t_{comando}) - T_{operao}, \quad (5.11)$$

em que T_{operao} é o tempo nominal de operação do disjuntor. Associado ao tempo nominal de operação do disjuntor, há uma dispersão estatística devido às incertezas no mecanismo de fechamento. Em função da dificuldade em estimar essa dispersão, ela não é levada em consideração no tempo de atraso, como pode ser visto na equação 5.11.

No entanto, em Barros (2013) é apresentado um estudo sobre a influência da suportabilidade

dielétrica do disjuntor em manobras controladas de linhas de transmissão, bem como a dispersão mecânica dos contatos. Dentre os modelos avaliados para representar a taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica (TDSD), o modelo segundo uma reta, embora bastante simples, é suficiente para incluir o efeito do pré-arco conforme mostrado no trabalho, o qual é comparado com modelos mais complexos, como modelos clássicos de arco elétrico. Na seção seguinte é apresentado como o efeito da suportabilidade dielétrica dos disjuntores é incluído nas manobras de chaveamento controlado, bem como os atrasos que são dados nos instantes de fechamento para reduzir a influência do pré-arco.

5.2 SUPORTABILIDADE DIELÉTRICA DOS DISJUNTORES EM MANOBRAS CONTROLADAS

A suportabilidade dielétrica é comumente expressa pela TDSD do disjuntor (CIGRE Working Group 13.07, 2011). Desta forma, a característica da suportabilidade pode ser modelada segundo uma reta com inclinação igual à TDSD. Trata-se de uma representação simples e de fácil implementação, pois o principal dado necessário, que é a TDSD, é geralmente fornecido pelo fabricante do disjuntor ou pode ser obtido por meio de testes. E até mesmo no caso de disjuntores mais antigos, que já estão em serviço, há um método de identificação da TDSD baseado na comparação de um conjunto de padrões de pré-arco, calculados numericamente, com medições realizadas com o disjuntor real em campo (KRUSI; FROHLICH, 2002).

Na Figura 5.5 é mostrada a representação da suportabilidade segundo uma reta, que consiste em uma curva linear com inclinação igual à TDSD.

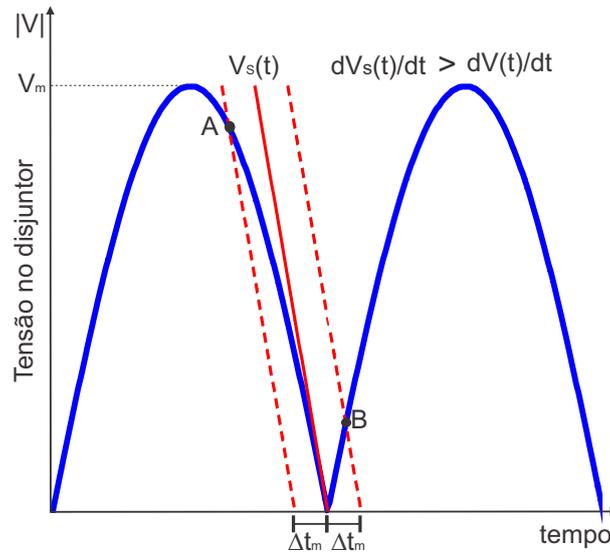


Figura 5.5. Curva da suportabilidade dielétrica representada por uma reta associada à dispersão mecânica.

De acordo com a Figura 5.5, a tensão de pré-arco pode assumir valores elevados a depender do desvio mecânico associado ao tempo de operação do disjuntor, cujo valor máximo é representado pelo ponto A. Essa representação foi implementada no ATP com auxílio da linguagem MODELS(DUBE, 1996), e é associada à chave controlada do ATP, que representa o disjuntor. A característica da suportabilidade é dada pela seguinte equação:

$$V_s(t) = -S(t - t_{otimo}), \tag{5.12}$$

em que S é a TDSD (dV_s/dt). Então, quando é dado o comando para fechamento dos contatos do disjuntor, o valor da suportabilidade dielétrica é calculado a cada passo de integração e é comparado com o valor absoluto da tensão sobre o disjuntor, $|V(t)|$. No instante em que a tensão sobre o disjuntor for superior à tensão disruptiva do meio isolante, dada pela equação 5.12, detecta-se que ocorreu uma ruptura dielétrica, e um sinal de comando é enviada à chave para que seja fechada. Na Figura 5.6 é mostrado o esquema que ilustra o funcionamento dessa representação da suportabilidade dielétrica.

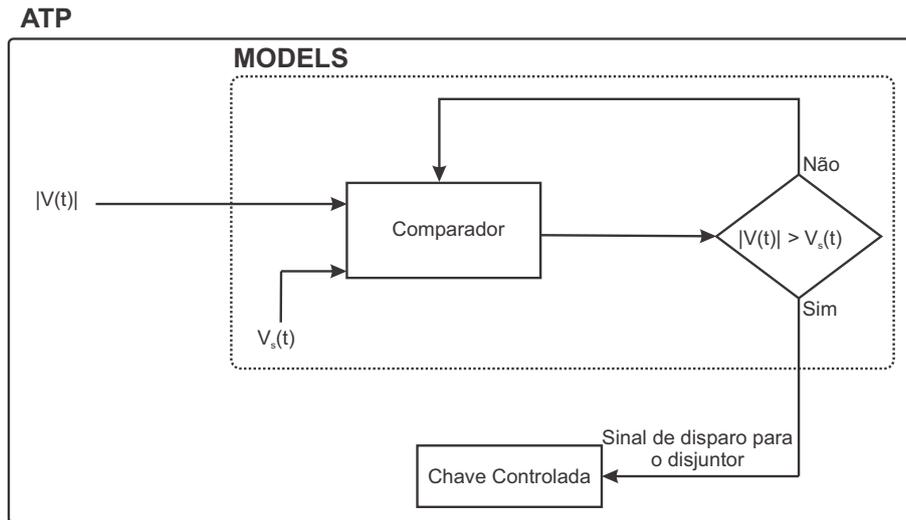


Figura 5.6. Representação da suportabilidade dielétrica com TDS linear no ATP.

Como mostrado na Figura 5.5, dependendo do desvio mecânico em relação ao tempo nominal de operação do disjuntor, as tensões de pré-arco podem ser elevadas, o que acarreta maiores sobretensões. Para minimizar a tensão máxima de pré-arco, o instante ótimo de fechamento deve ser atrasado, conforme mostrado nas Figuras 5.7 (a) e (b). Na Figura 5.7 (a), tem-se o caso em que a taxa de suportabilidade dielétrica é maior ou igual à máxima derivada do sinal de tensão do sistema, dV/dt , enquanto que na Figura 5.7(b), a taxa de suportabilidade é menor que dV/dt .

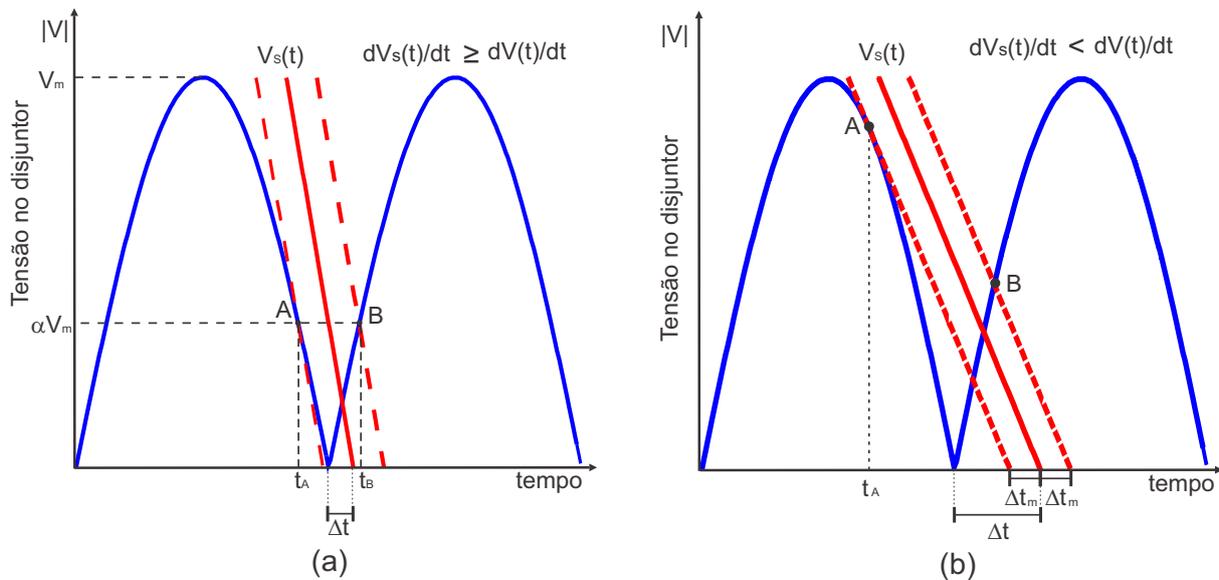


Figura 5.7. Ajuste do instante ótimo para minimizar a máxima tensão de pré-arco.

O atraso Δt pode ser obtido analiticamente, sendo função das características do disjuntor

e do sistema elétrico (ROCHA *et al.*, 1997). Então, a partir das relações geométricas entre as grandezas da Figura 5.7, determina-se o atraso ótimo.

Para a situação ilustrada na Figura 5.7 (a), a equação do atraso é dada por:

$$\Delta t = \frac{V_m \text{sen}(\omega \Delta t_m)}{dV_s/dt}, \quad (5.13)$$

em que V_m é o pico da tensão do sistema, ω é a frequência angular nominal do sistema e dV_s/dt é a taxa de decaimento da suportabilidade dielétrica do disjuntor. Para o segundo caso, em que a taxa de decaimento é inferior à derivada máxima da tensão do sistema, são encontradas duas equações para o atraso:

$$\Delta t = \frac{\text{sen}(\omega t_A)}{\omega k} - t_A + \Delta t_m, \quad \text{quando } t_A < t_{otimo} - \Delta t_m, \quad (5.14)$$

$$\Delta t = \frac{\text{sen}(\omega t_m)}{\omega k}, \quad \text{quando } t_A > t_{otimo} - \Delta t_m, \quad (5.15)$$

em que t_A é o instante em que a característica da suportabilidade dielétrica associada ao desvio mecânico tangencia o sinal de tensão sobre o disjuntor e k é a TDSD normalizada. Com as equações 5.13, 5.14 e 5.15, é possível ajustar os instantes de fechamento do disjuntor que foram calculados pelo método de chaveamento de modo a reduzir o efeito do decaimento da suportabilidade dielétrica. Essas equações são implementadas utilizando a MODELS, e modificam o instante ótimo calculado pela técnica de chaveamento controlado.

5.3 ESTIMAÇÃO DA CARGA RESIDUAL EM LINHAS APENAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Com a análise apresentada no Capítulo 4, verificou-se que, quando ocorre uma falta em linhas apenas com compensação série, o valor da carga residual é um sinal de tensão contínua e depende das características do defeito. Portanto, para esses casos a informação da polaridade da carga residual não é suficiente para estimar os melhores instantes para o religamento da linha. Na subseção 5.1.4, uma solução foi proposta com a finalidade de estimar corretamente

esses instantes de fechamento. No entanto, para viabilizar a solução apresentada, é necessário estimar a tensão do lado da linha. Para isto, nesta seção é apresentado um filtro digital que deve ser colocado na saída do TPC a fim de compensar a sua resposta, permitindo a medição de tensões contínuas.

A medição das tensões em um sistema em EAT e UAT é feita por transformadores de potencial capacitivo, e as técnicas de chaveamento controlado se baseiam nos sinais de tensão do secundário destes equipamentos. Um modelo típico de TPC de 500 kV é apresentado em (PAJUELO *et al.*, 2008), ilustrado na Figura 5.8.

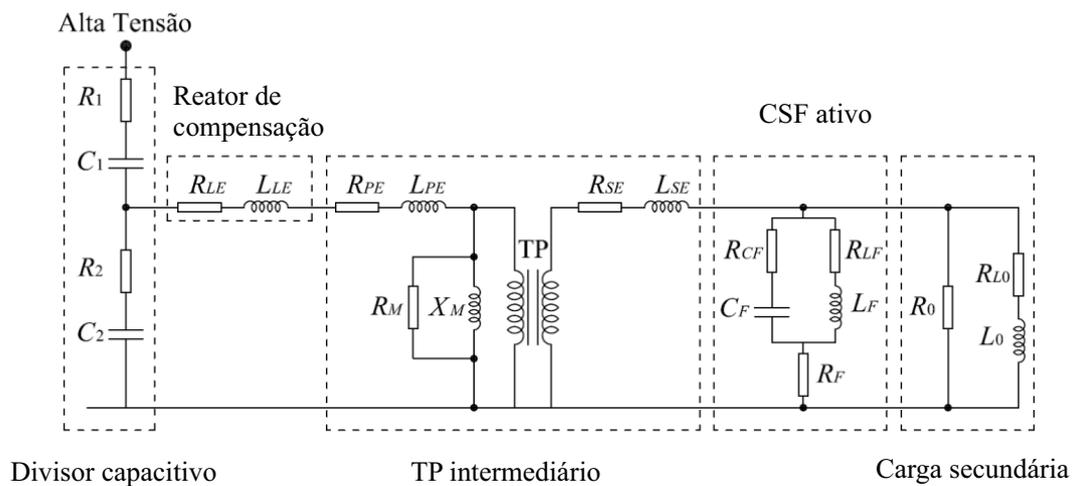


Figura 5.8. Modelo de TPC de 500 kV(PAJUELO *et al.*, 2008).

A resposta em frequência desse TPC é mostrada na Figura 5.9, em que se observa que o TPC não reproduz fielmente os sinais de tensão primários com frequências diferentes da fundamental. Portanto, para o caso de linhas apenas com compensação série, em que os sinais de tensão são em corrente contínua, o TPC não reproduz a tensão, como mostrado na Figura 5.10. Neste exemplo, trata-se de uma falta bifásica CA, em que se observa claramente o erro de medição inserido pelo TPC, o que compromete a aplicação de uma técnica de chaveamento controlado, visto que a estimativa da carga residual é essencial para estimar o sinal de referência.

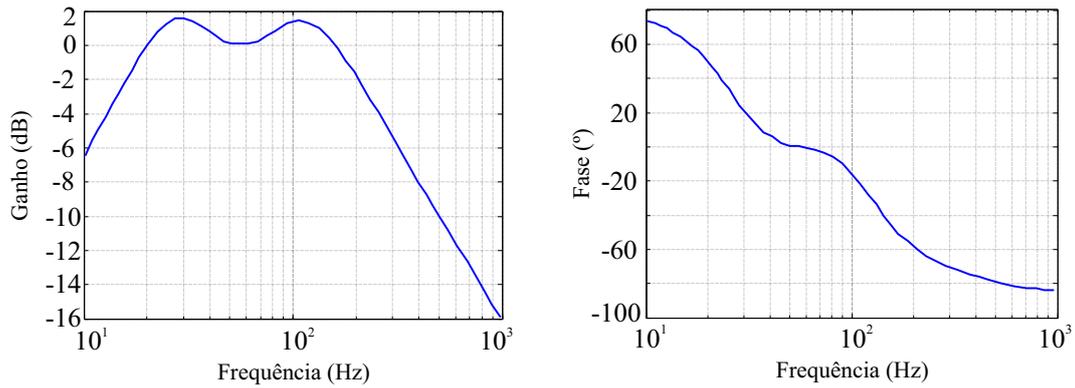


Figura 5.9. Resposta em frequência do modelo de TPC de (PAJUELO *et al.*, 2008).

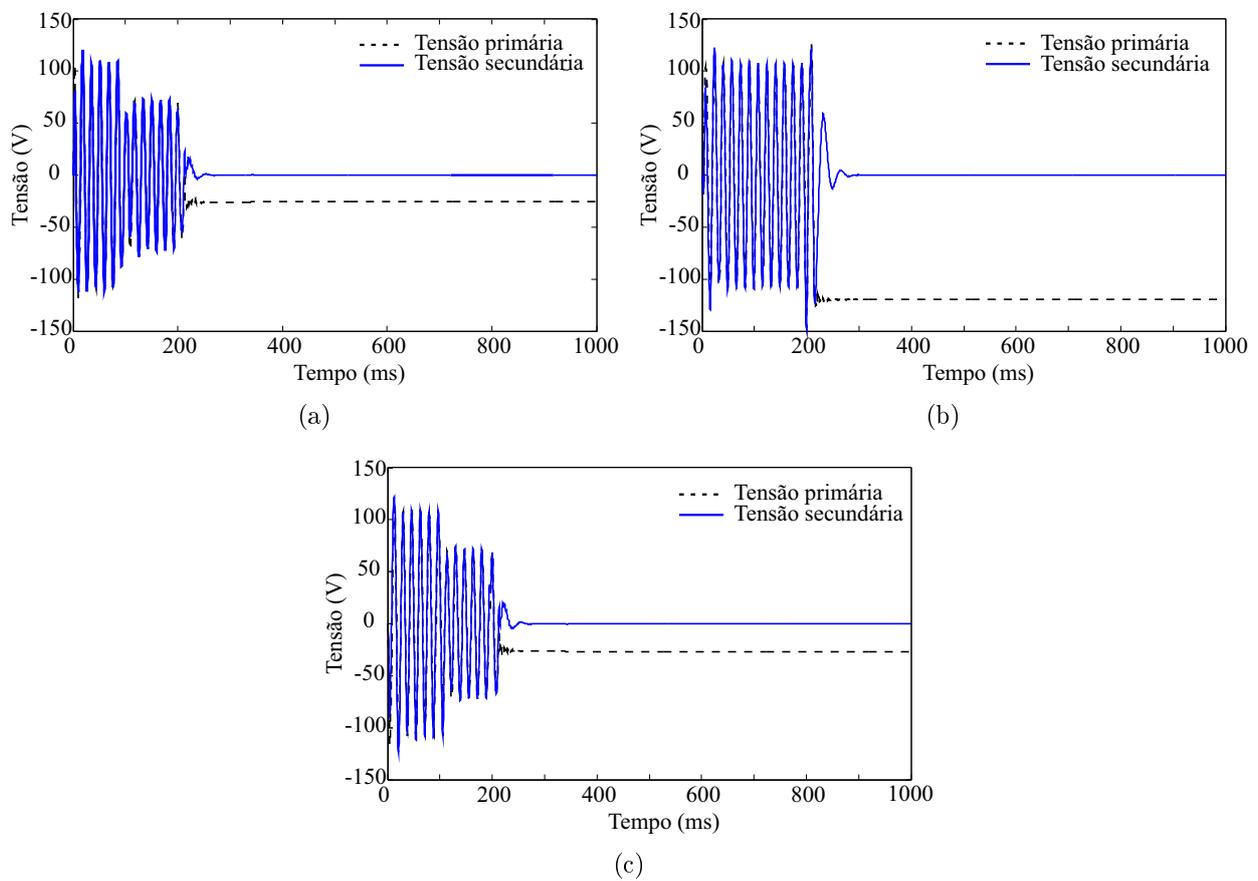


Figura 5.10. Sinais de tensão do lado da linha vistos na entrada (primário) e saída (secundário) do TPC em uma linha apenas com compensação série, cuja abertura foi causada por uma falta CA: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

Uma das formas de corrigir a saída do TPC é por meio do uso de um filtro digital, cuja finalidade é compensar uma largura de banda mínima do TPC, no domínio da frequência, e corrigir os transitórios de baixa frequência, no domínio do tempo. Neste trabalho, utilizou-se o método proposto em Machado (2013), cujo algoritmo para correção se baseia na definição de

transmissão sem distorção, isto é, o sinal de saída corresponde ao sinal de entrada com atraso de transmissão, t_0 , e uma mudança de amplitude, K :

$$y(t) = Kx(t - t_0), \tag{5.16}$$

A resposta em frequência de um sistema sem distorção é dada por:

$$H(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = Ke^{-j\omega t_0}, \tag{5.17}$$

Portanto, é projetado um filtro digital recursivo para compensar a resposta em frequência do TPC, de modo que as respostas de módulo e fase do conjunto TPC+compensador se aproximem de $H(j\omega)$ para uma dada faixa de frequência. Neste trabalho, o compensador foi projetado para a faixa de 1 a 60 Hz. Trata-se de um filtro digital em cascata de segunda ordem, dado por:

$$\frac{V_{saiada}(z)}{V_{entrada}(z)} = k_0 \prod_{i=1}^p \frac{1 + c_{i1}z^{-1} + c_{i2}z^{-2}}{1 + d_{i1}z^{-1} + d_{i2}z^{-2}}, \tag{5.18}$$

Os coeficientes do filtro são determinados a partir do método de Levenberg-Marquardt. Na Tabela 5.1 são mostrados os coeficientes do filtro utilizado neste trabalho para uma frequência de amostragem de 1920 Hz (DANTAS *et al.*, 2015). O coeficiente de escalonamento, k_0 , é igual a 5,2122.

Tabela 5.1. Coeficientes do compensador no domínio z para TPC de 500 kV.

Seção i	c_{i1}	c_{i2}	d_{i1}	d_{i2}
1	-1,5511	0,6550	-1,7544	0,7825
2	-1,9280	0,9372	-2,0	1,0
3	-1,4346	0,4637	0	0

Na Figura 5.11, são apresentados os sinais de tensão do lado da linha com e sem o uso do compensador. Como observado, a tensão secundária é corrigida com sucesso, o que torna possível a estimação da carga residual, etapa essencial para a aplicação do chaveamento controlado.

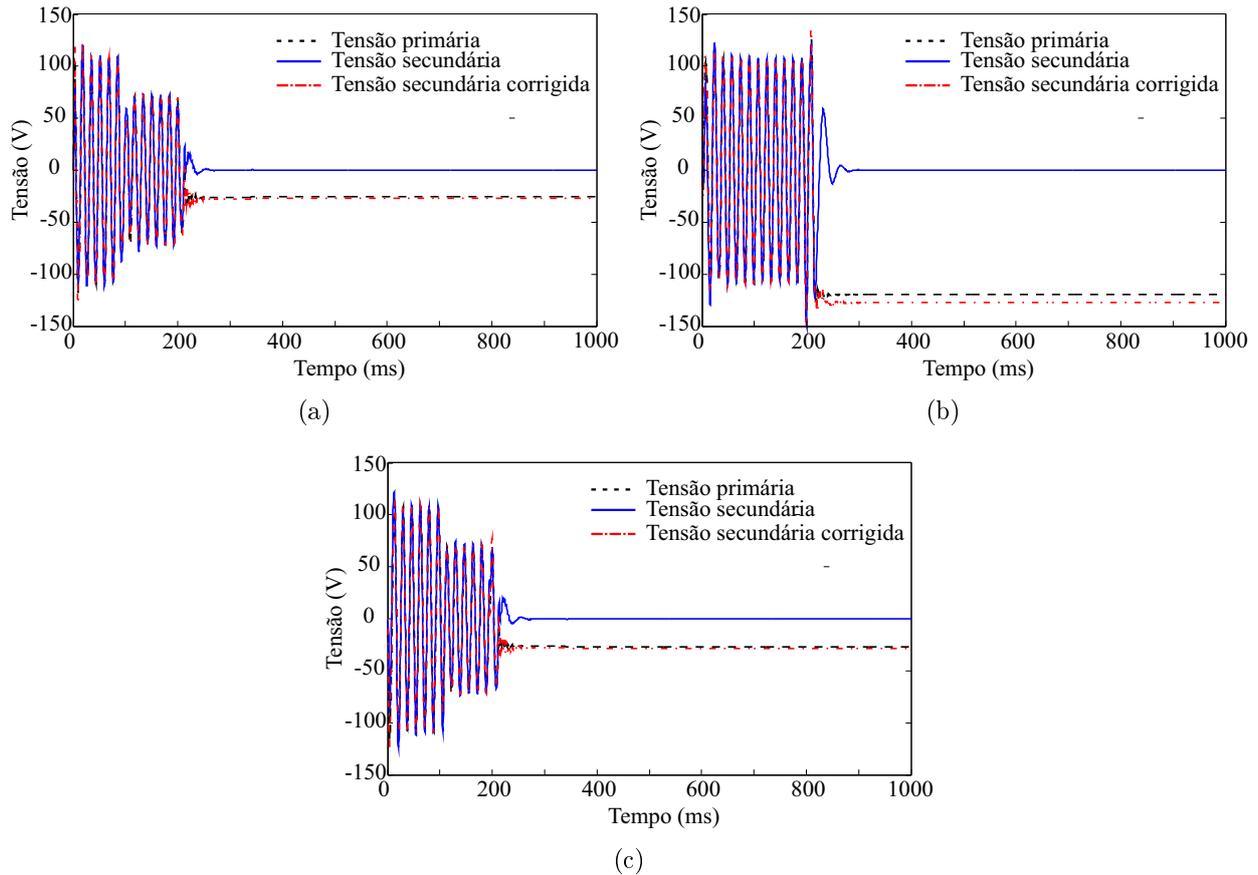


Figura 5.11. Sinais de tensão do lado da linha resultantes do uso do filtro compensador na saída do TPC: (a) fase A; (b) fase B; (c) fase C.

A escolha do filtro compensador para esta finalidade se baseou nas principais características do método proposto, como a estimação dos coeficientes a partir da resposta em frequência do transformador, de modo que não depende das condições operacionais do sistema. Além disso, o filtro foi desenvolvido para a correção de sinais primários numa faixa de frequência que compreende até a fundamental (60 Hz), que é suficiente para a aplicação de chaveamento controlado.

5.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as técnicas de chaveamento controlado selecionadas para avaliar o desempenho do religamento trifásico em linhas com compensação série (DANTAS *et al.*, 2008; DANTAS *et al.*, 2014). Para linhas com ambos os tipos de compensação reativa, a técnica selecionada é aplicada em linhas apenas com compensação em derivação, e se baseia na

estimação dos zeros dos sinais de tensão do lado da linha e do lado da fonte. Enquanto que para linhas apenas com compensação série, um método que se baseia na estimação da carga residual da linha é proposto neste trabalho. A fim de viabilizar a aplicação de tal método, visto que a tensão do lado da linha é contínua, foi proposto a utilização de um filtro compensador na saída do transformador de potencial capacitivo.

No próximo capítulo, o desempenho do chaveamento controlado é apresentado para diferentes configurações de linhas com compensação série, considerando diferentes condições de falta a fim de abordar as diversas condições de operação do BCS.

AVALIAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO DE LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Neste capítulo, apresenta-se uma avaliação do desempenho do chaveamento controlado de linhas com compensação reativa série a partir de simulações digitais via ATP. Para isto, foram realizadas simulações de manobra de religamento trifásico nos principais arranjos de linhas com compensação série, considerando diferentes cenários quanto à causa da abertura da linha. O sistema elétrico apresentado no Capítulo 4 é utilizado para essa avaliação.

Dados de um disjuntor à gás de 550 kV foram utilizados para modelar o equipamento de manobra (KOHYAMA *et al.*, 2001), com desvio padrão no tempo de fechamento dos contatos de 0,3 ms e uma TDSD de 0,9 pu. Os resultados são apresentados a partir do perfil das sobretensões máximas ao longo da linha com probabilidade de ocorrência igual ou menor que 2% (IEEE... , 2011) para um conjunto de 50 simulações para cada caso analisado.

Na primeira parte, são apresentados os resultados referentes ao religamento controlado de linhas apenas com compensação série. Nesta parte, é avaliado o desempenho método proposto para os casos em que a abertura da linha é causada por uma falta, como mostrado no capítulo anterior.

Na segunda parte, é avaliado o desempenho do chaveamento controlado em linhas com ambos os tipos de compensação reativa. E por fim, avalia-se o impacto da reinserção do BCS antes da manobra de religamento no desempenho do chaveamento controlado.

6.1 AVALIAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LINHAS APENAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE

Em manobras de religamento, cuja abertura da linha não foi causada por um defeito, os instantes mais adequados para o religamento correspondem aos instantes de máximo ou mínimo

do sinal de tensão sobre o disjuntor. Como apresentado no capítulo anterior, o método utilizado neste trabalho se baseia na estimação do sinal de tensão do lado da fonte e na detecção da polaridade da carga residual.

Na Figura 6.1, são analisados os perfis de sobretensões máximas ao longo da linha para dois arranjos: linha com um BCS no terminal local (arranjo I) e linha com um BCS no meio da linha (arranjo II). O desempenho do chaveamento controlado é avaliado a partir da comparação das sobretensões resultantes de manobras não controladas com as sobretensões em linhas com graus de compensação de 40% e 50%. Na Tabela 6.1, são apresentadas as sobretensões máximas para cada caso avaliado.

Com estes resultados, verifica-se a potencialidade do chaveamento controlado em linhas apenas com compensação série. Enquanto que em manobras não controladas, as sobretensões podem atingir mais de 2,5 pu, com o chaveamento controlado, as sobretensões são menores que 1,7 pu. Em relação aos arranjos avaliados, observa-se que as sobretensões são maiores no arranjo I. Além disso, observa-se que para os graus de compensação avaliados, a influência é desprezível quanto à redução das sobretensões.

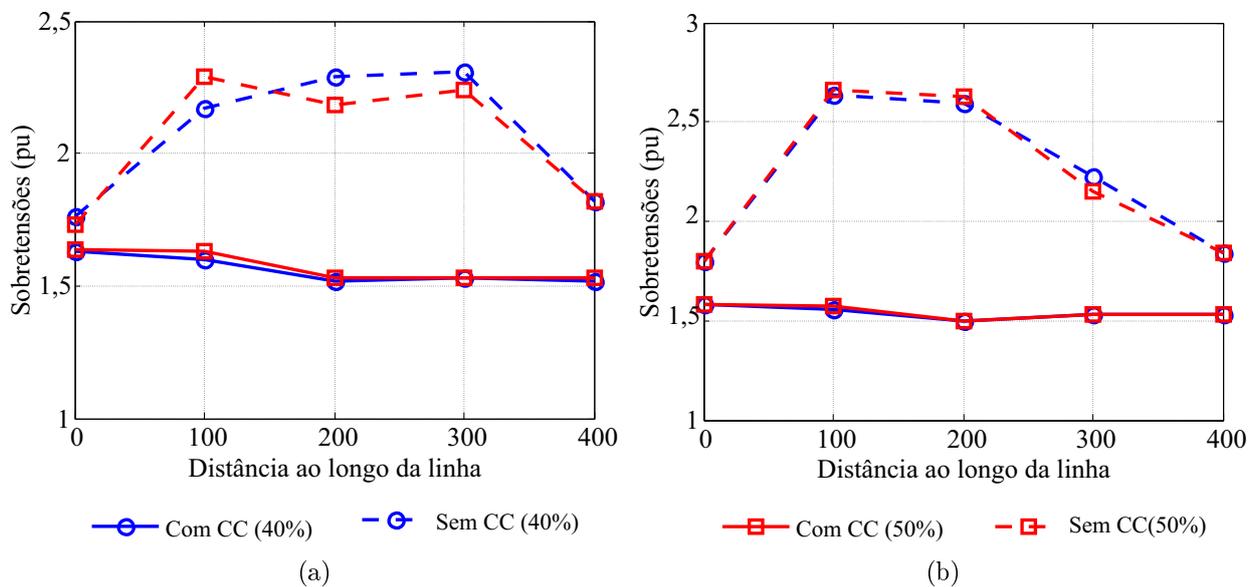


Figura 6.1. Perfil das sobretensões ao longo da linha para os arranjos apenas com compensação série para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta: (a) arranjo I; (b) arranjo II.

Quando a abertura da linha é causada por uma falta, a carga residual resultante pode ser menor que 1,0 pu, em módulo, como apresentado no Capítulo 4. Desta forma, o método tradicionalmente aplicado em linhas não compensadas, que consiste na estimação dos instantes

Tabela 6.1. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série para uma abertura trifásica sem defeito.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)			
	$GC_{srie} = 40\%$		$GC_{srie} = 50\%$	
	Sem CC	Com CC	Sem CC	Com CC
I	2,31	1,63	2,29	1,64
II	2,64	1,58	2,66	1,58

de mínimo ou máximo do sinal de tensão sobre o disjuntor, não corresponde aos instantes de passagem por zero. Deste modo, foi proposto no Capítulo 5, um novo cálculo para os instantes de fechamento para esses casos. A fim de avaliar o desempenho do ajuste proposto, os seguintes casos são avaliados:

- Caso 1: falta fase-terra BT a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 2: falta fase-fase CA a 100 km do terminal local da linha;
- Caso 3: falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local da linha;
- Caso 4: falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local da linha.

O grau de compensação adotado nesses casos é de $GC_{srie} = 40\%$. As sobretensões ao longo da linha são comparadas com as sobretensões obtidas quando o método tradicional é aplicado.

Na Figura 6.2, são apresentados os resultados para o caso 1. Na Tabela 6.1, são apresentadas as sobretensões máximas obtidas em cada caso avaliado. Verifica-se que o ajuste proposto para a estimação dos instantes de fechamento resultou em melhor desempenho quanto à redução das sobretensões em ambos os arranjos de linha avaliados. Além disso, observa-se mais uma vez a importância da aplicação do chaveamento controlado, que garante sobretensões de manobra menores que 2,0 pu. Observa-se que o esquema II apresentou as maiores sobretensões.

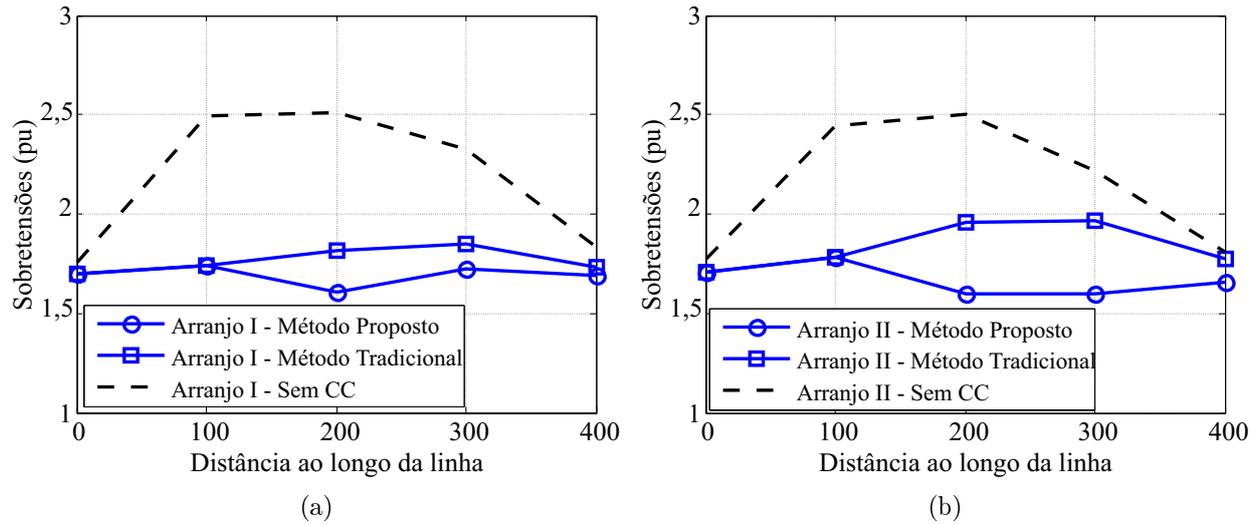


Figura 6.2. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{serie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra BT a 100 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.

Tabela 6.2. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{serie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-terra BT a 100 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)		
	Sem Chaveamento Controlado	Método Tradicional	Método Proposto
I	2,51	1,85	1,74
II	2,50	1,97	1,78

Na Figura 6.3 e na Tabela 6.1, são apresentados os resultados para o caso 2. Observa-se que as sobretensões são menores com o método proposto, com mesmo desempenho nos dois arranjos avaliados.

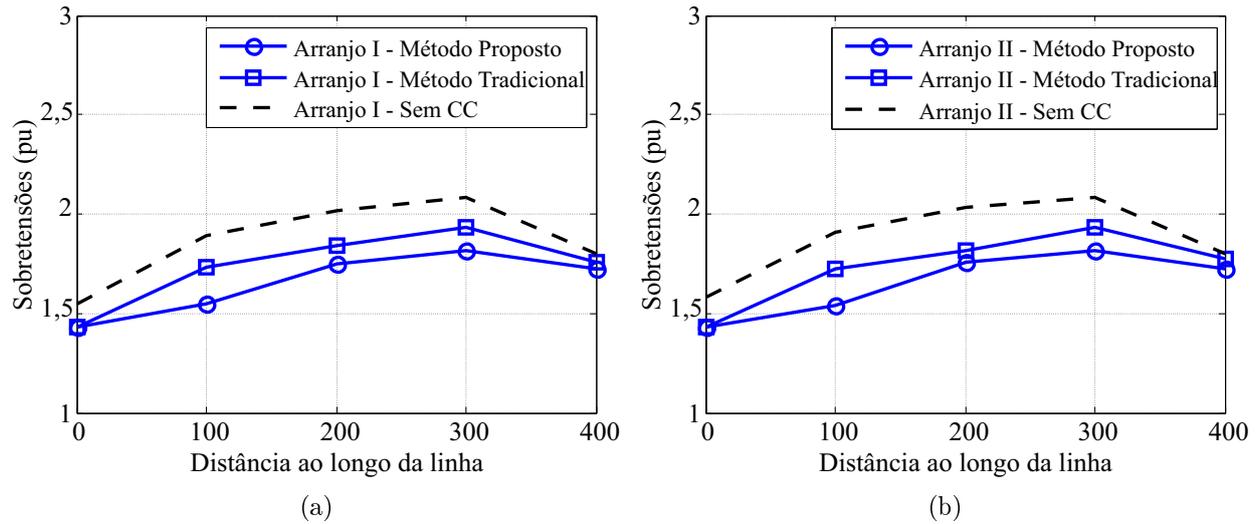


Figura 6.3. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA a 100 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.

Tabela 6.3. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-fase CA a 100 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)		
	Sem Chaveamento Controlado	Método Tradicional	Método Proposto
I	2,08	1,93	1,82
II	2,08	1,93	1,82

Os resultados referentes ao caso 3 são apresentados na Figura 6.4 e na Tabela 6.1. Constatase mais uma vez que a redução das sobretensões é maior com o novo cálculo dos instantes de religamento.

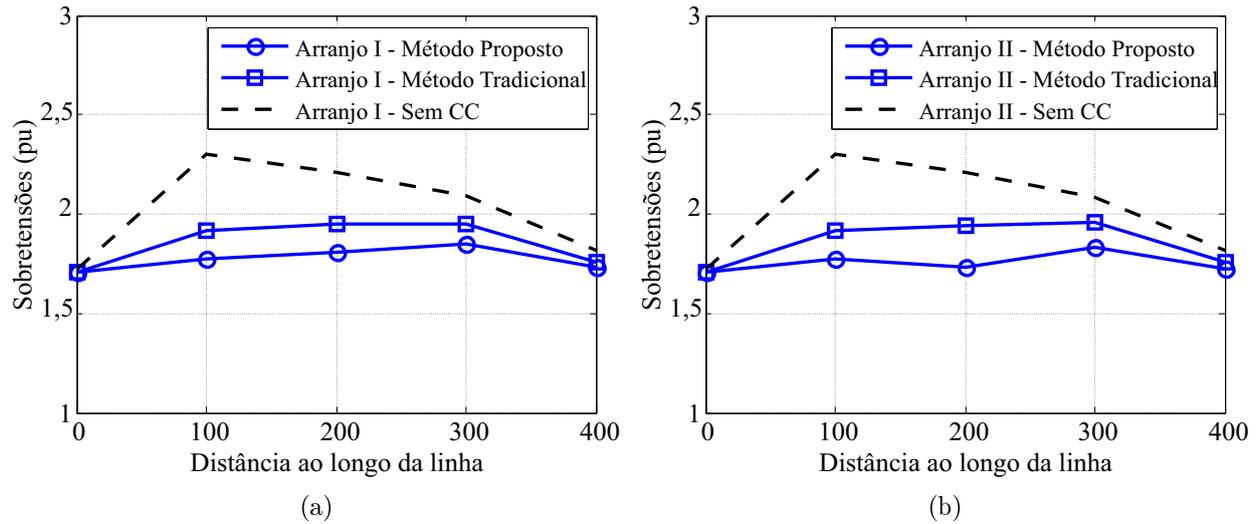


Figura 6.4. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.

Tabela 6.4. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)		
	Sem Chaveamento Controlado	Método Tradicional	Método Proposto
I	2,30	1,95	1,85
II	2,30	1,96	1,83

Os resultados referentes ao caso 4 são apresentados na Figura 6.5 e na Tabela 6.1. Observa-se que com o método tradicionalmente aplicado, as sobretensões não são reduzidas. Com o novo cálculo dos instantes de religamento, as sobretensões são menores que 1,80 pu.

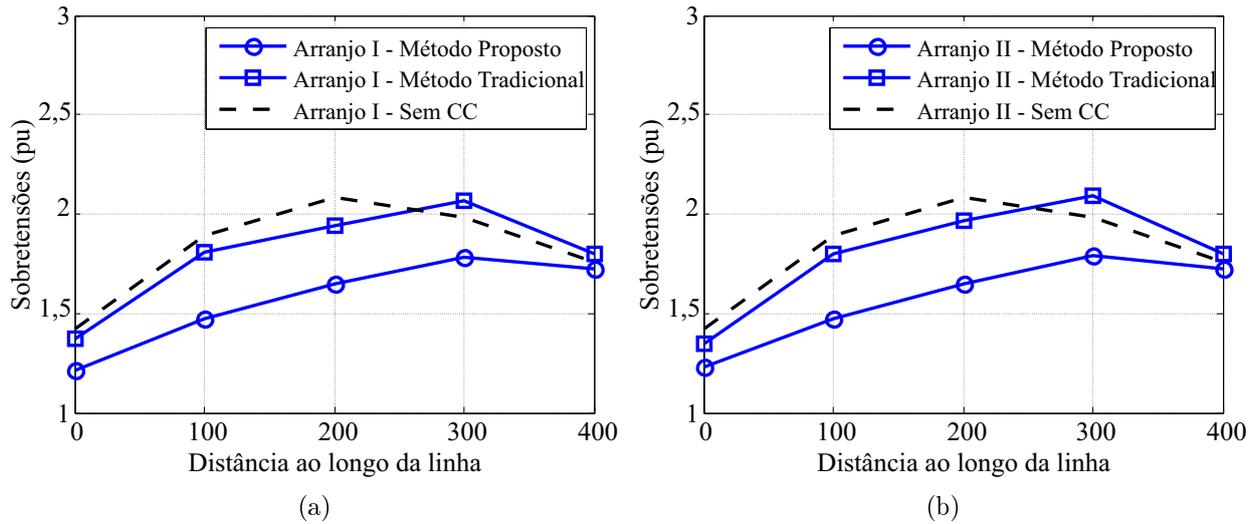


Figura 6.5. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local: (a) arranjo I; (b) arranjo II.

Tabela 6.5. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{srie} = 40\%$) para uma abertura trifásica devido a falta trifásica ABCT a 300 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)		
	Sem Chaveamento Controlado	Método Tradicional	Método Proposto
I	2,08	2,08	1,78
II	2,09	2,09	1,79

Com estes resultados, constata-se que o ajuste proposto para a estimação dos instantes de religamento apresenta desempenho melhor em relação ao método tradicional. Na Figura 6.6, são apresentados os perfis de sobretensões ao longo da linha para os mesmos casos avaliados anteriormente, mas com grau de compensação igual a $GC_{srie} = 50\%$. De acordo com os resultados, observa-se que as sobretensões tendem a ser maiores em linhas com grau de compensação maior.

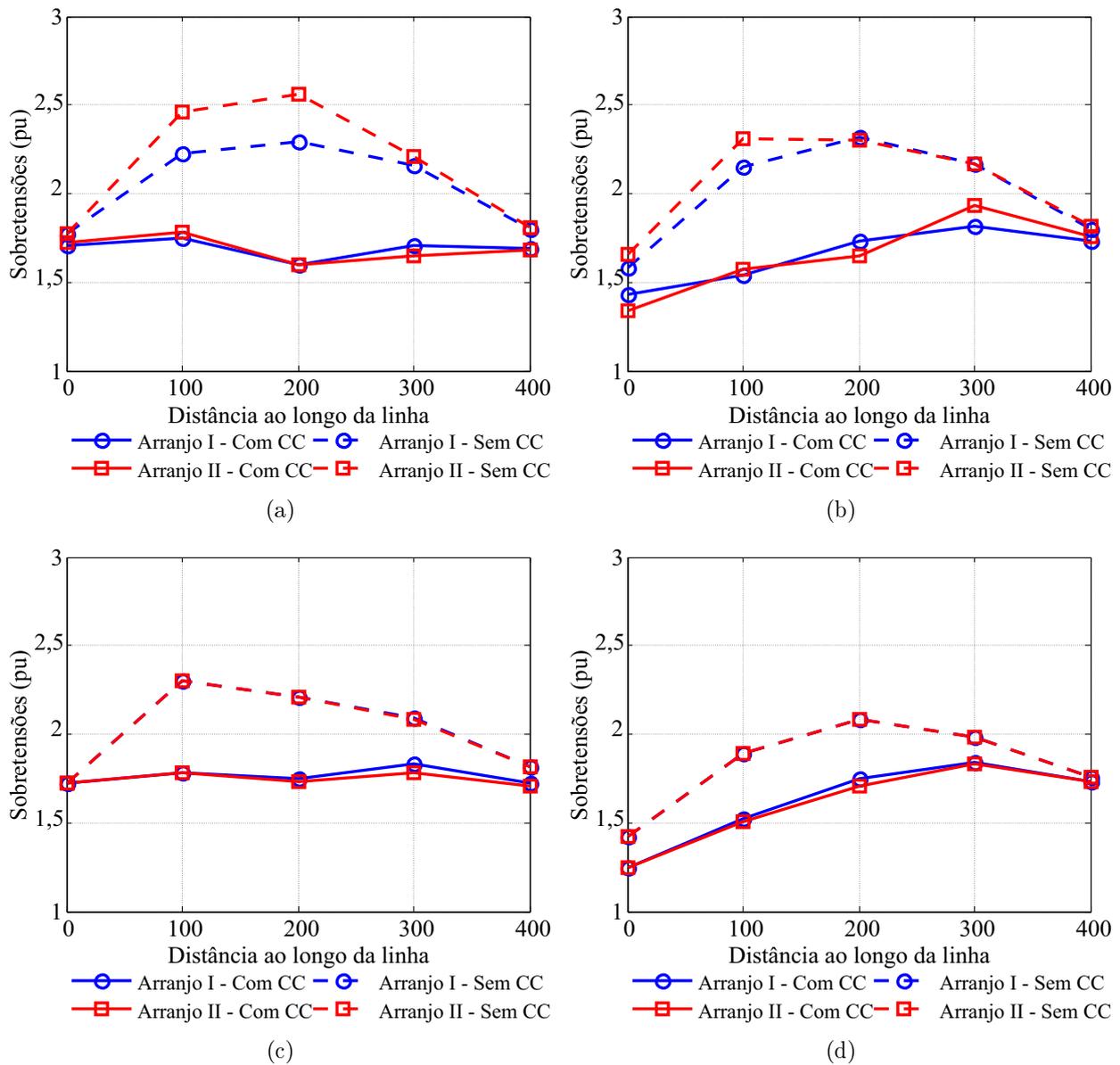


Figura 6.6. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série ($GC_{série} = 50\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta: (a) fase-terra BT a 100 km do terminal local; (b) fase-fase CA a 100 km do terminal local; (c) fase-fase-terra ABT a 300 km do terminal local; (d) trifásica ABCT a 300 km do terminal local.

Tabela 6.6. Sobretensões máximas em linhas apenas com compensação série ($GC_{série} = 50\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)							
	Caso 1		Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	SC	CC	SC	CC	SC	CC	SC	CC
I	2,29	1,75	2,32	1,82	2,30	1,82	2,08	1,84
II	2,56	1,78	2,31	1,93	2,30	1,78	2,08	1,83

6.2 AVALIAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO EM LINHAS COM COMPENSAÇÃO SÉRIE E EM DERIVAÇÃO

Nesta seção, os resultados referentes ao desempenho do chaveamento controlado em linhas com ambos os tipos de compensação reativa são apresentados. Na primeira parte, são apresentados os perfis de sobretensões ao longo da linha para os casos em que a abertura da linha não foi causada por um defeito. Em seguida, são apresentados os resultados para os casos com ocorrência de falta na linha, avaliando os mesmos casos do Capítulo 4. Os graus de compensação considerados nesta avaliação são: $GC_{srie} = 50\%$ e $GC_{shunt} = 70\%$.

Os resultados para abertura de linha sem ocorrência de defeito para os arranjos IV, V e VI são apresentados na Figura 6.7 e na Tabela 6.2. Tem-se o mesmo desempenho quanto à redução das sobretensões nos arranjos V e VI. No arranjo IV, as maiores sobretensões são observadas. Neste arranjo, um BCS está instalado no terminal local com reatores em derivação instalados após o capacitor série. Nos demais esquemas, os reatores em derivação estão instalados antes do BCS. Com isto, verifica-se que a localização da compensação série em relação aos reatores em derivação influencia no resultado do chaveamento controlado.

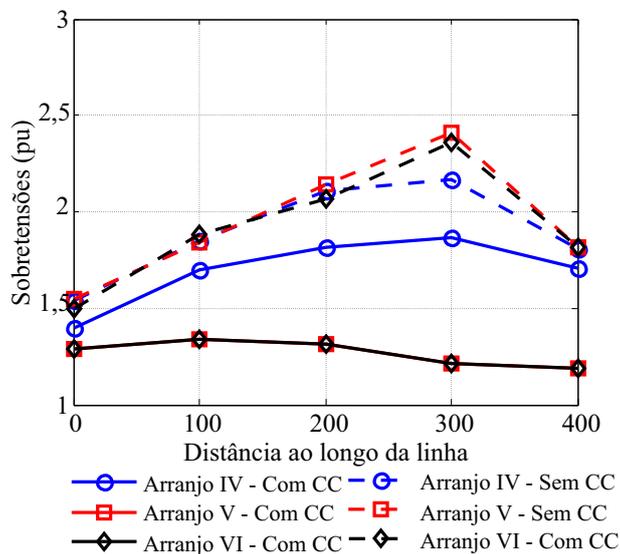


Figura 6.7. Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta para os arranjos IV, V e VI.

Os resultados para abertura de linha devido a um defeito fase-terra AT para os arranjos IV, V e VI são apresentados na Figura 6.8 e na Tabela 6.2. Observa-se a redução das sobretensões

Tabela 6.7. Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica sem ocorrência de falta.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)	
	Sem Chaveamento Controlado	Com Chaveamento Controlado
IV	2,17	1,87
V	2,41	1,35
VI	2,36	1,34

com a aplicação do chaveamento controlado. Em todos os arranjos, ocorreu o *by-pass* parcial da compensação série, com o capacitor série da fase envolvida na falta retirado de operação devido à falta.

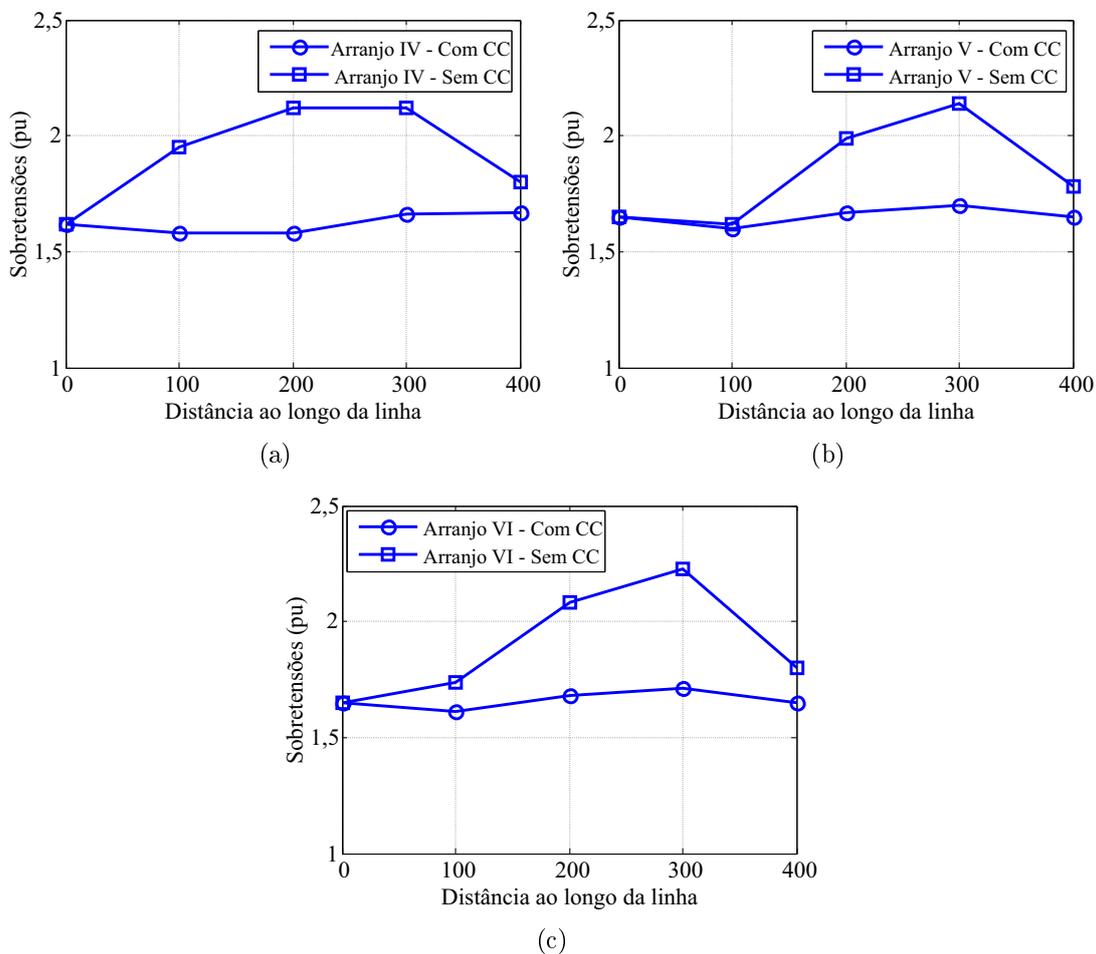


Figura 6.8. Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra AT: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI.

Para o caso de uma falta fase-fase CA a 100 km do terminal local, os resultados obtidos são apresentados na Figura 6.9 e na Tabela 6.2. Em todos os arranjos avaliados, ocorreu o *by-pass*

Tabela 6.8. Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-terra AT a 100 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)	
	Sem Chaveamento Controlado	Com Chaveamento Controlado
IV	2,36	1,74
V	2,18	1,70
VI	2,21	1,68

completo do banco, e as sobretensões são menores que 1,80 pu.

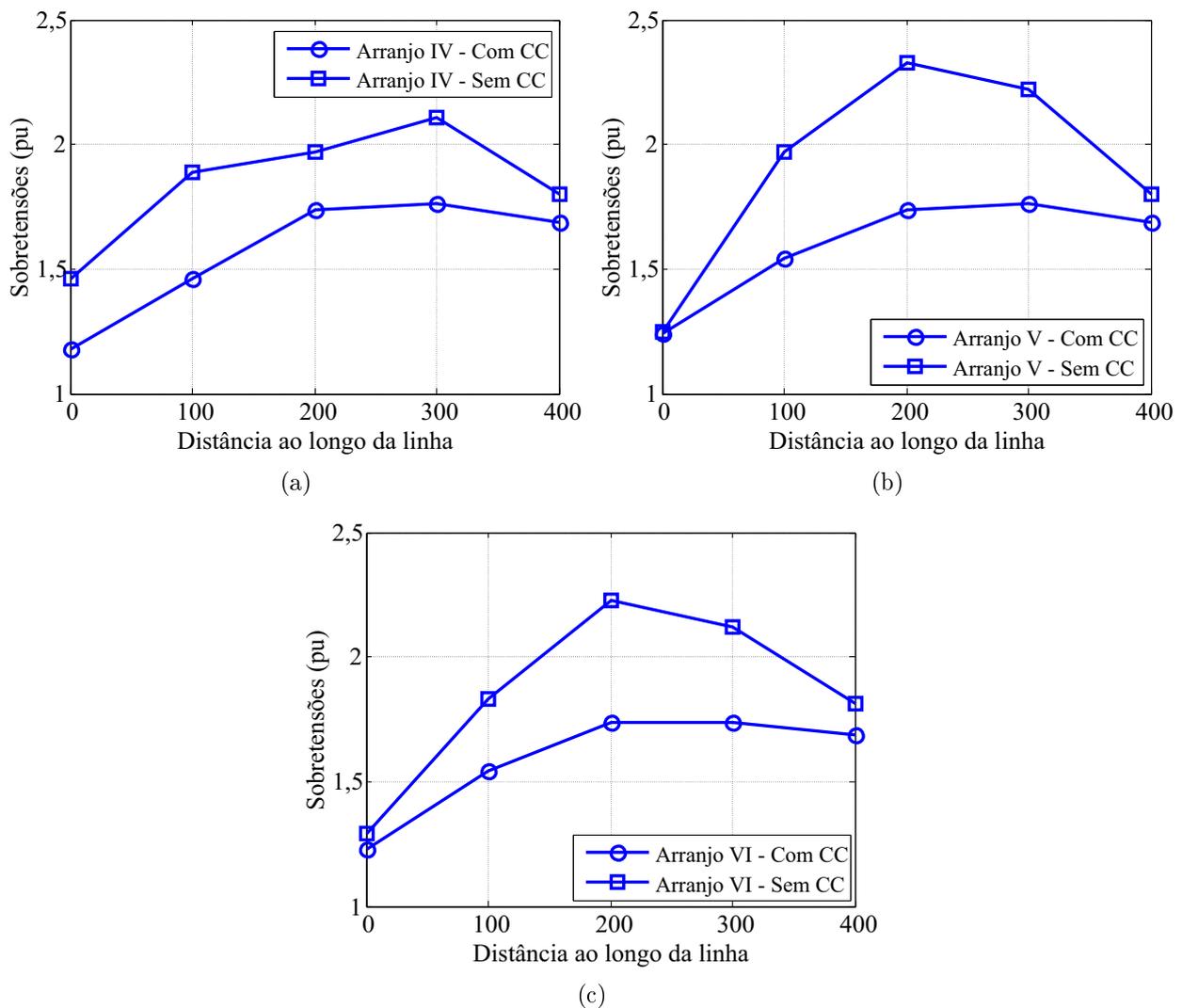


Figura 6.9. Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI.

Na Figura 6.10 e Tabela 6.2, os resultados referentes ao religamento controlado devido a uma falta fase-fase-terra a 300 km do terminal local são apresentados. Observa-se que o uso

Tabela 6.9. Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA a 100 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)	
	Sem Chaveamento Controlado	Com Chaveamento Controlado
IV	2,11	1,63
V	2,33	1,73
VI	2,23	1,65

do chaveamento controlado garante sobretensões menores que 1,80 pu em todos os arranjos avaliados.

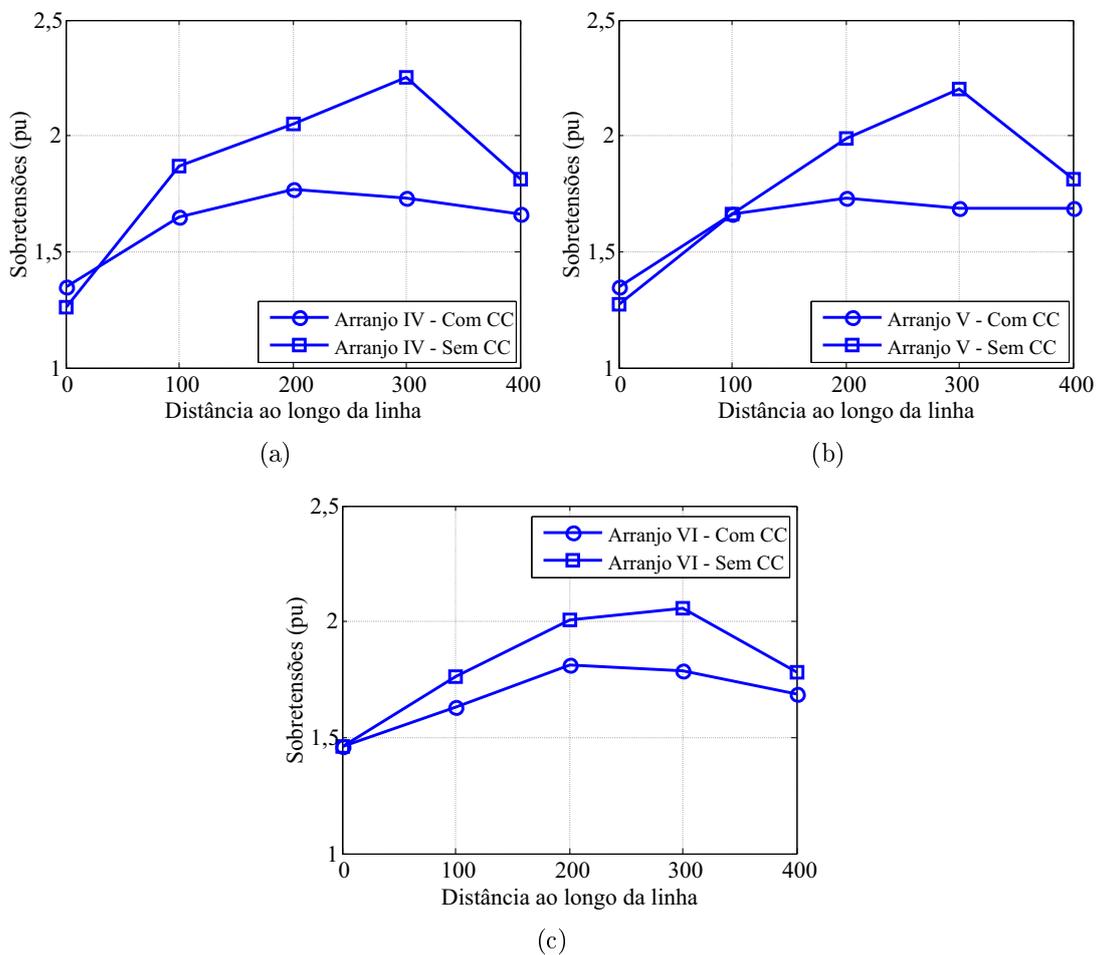


Figura 6.10. Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra BCT: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI.

Os resultados referentes ao religamento controlado devido a uma falta fase-fase a 300 km do terminal local são apresentados na Figura 6.11 e Tabela 6.2. As sobretensões são mantidas abaixo de 1,80 pu em todos os arranjos avaliados.

Tabela 6.10. Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase-terra BCT a 300 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)	
	Sem Chaveamento Controlado	Com Chaveamento Controlado
IV	2,25	1,74
V	2,20	1,67
VI	2,06	1,73

De acordo com os resultados apresentados, observa-se que as maiores sobretensões ocorrem no arranjo IV. Exceto no caso da abertura da linha sem ocorrência de defeito, em todos os demais casos, as sobretensões são menores que 1,80 pu, o que atesta a viabilidade de aplicação do chaveamento controlado em linhas com compensação série.

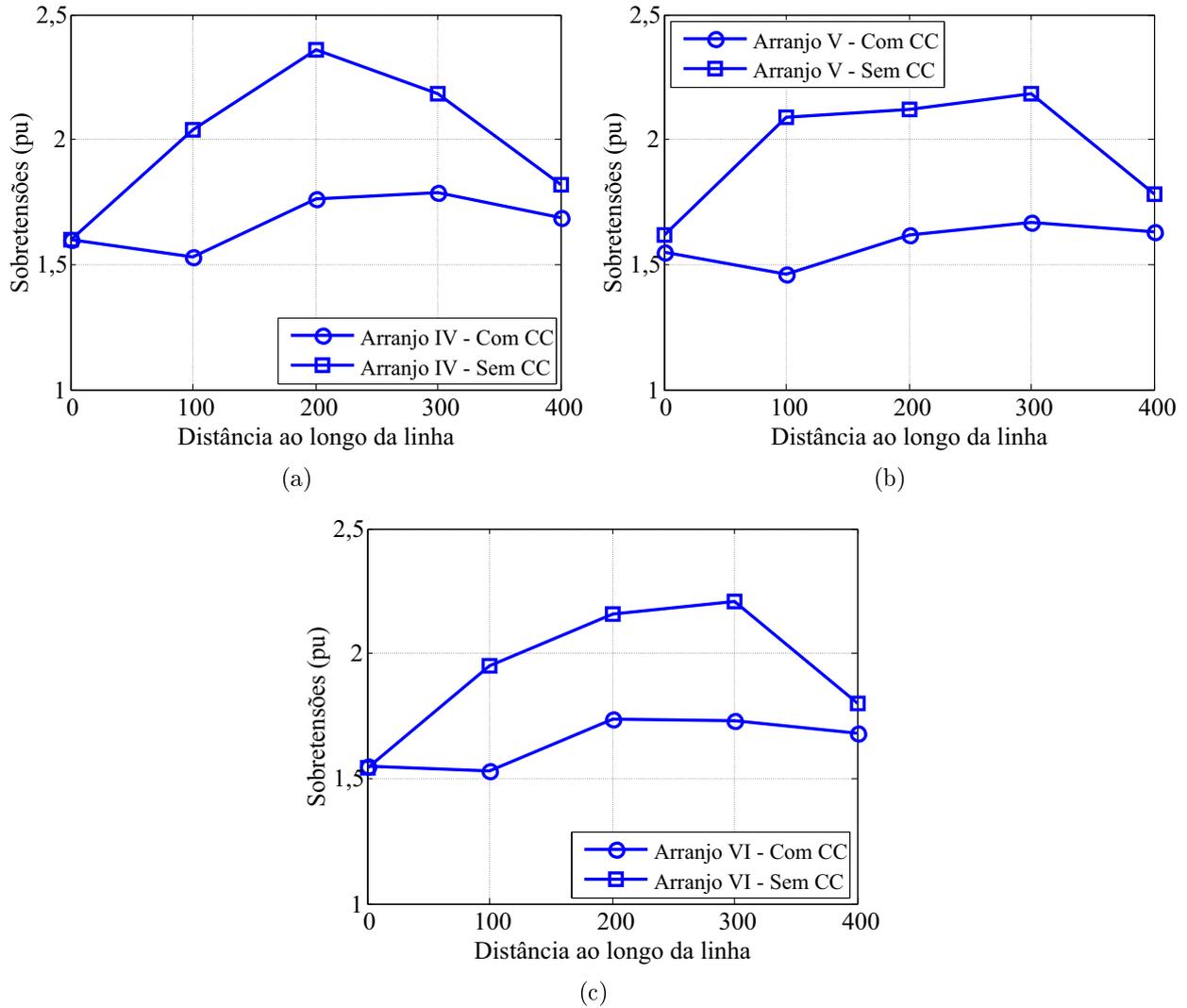


Figura 6.11. Perfil das sobretensões em linhas com compensação série e em derivação, com grau de compensação série 50% e em derivação de 70%, para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase AB: (a) arranjo IV; (b) arranjo V; (c) arranjo VI.

Tabela 6.11. Sobretensões máximas em linhas com compensação série ($GC_{srie} = 50\%$) e shunt ($GC_{shunt} = 70\%$) para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase AB a 300 km do terminal local.

Arranjo da linha	Sobretensões Máximas (pu)	
	Sem Chaveamento Controlado	Com Chaveamento Controlado
IV	2,36	1,74
V	2,18	1,70
VI	2,21	1,68

6.3 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA REINserÇÃO DO BCS ANTES DA MANOBRA DE RELIGAMENTO

Como visto no Capítulo 4, o BCS pode ser retirado de operação parcial ou totalmente nos casos em que a abertura da linha se deve à ocorrência de uma falta. Nestes casos, é importante avaliar qual seria o impacto no desempenho do chaveamento controlado caso a compensação série fosse restabelecida após a extinção da falta antes da manobra de religamento.

Para esta avaliação, avalia-se o arranjo II, que corresponde a uma linha apenas com um BCS instalado no meio da linha, para uma manobra de religamento oriunda de uma abertura trifásica devido a uma falta trifásica a 300 km do terminal local. A carga residual para esse caso foi apresentada no Capítulo 4, em que foi verificado que todo o BCS é retirado de operação completamente.

Na Figura 6.12, o perfil das sobretensões ao longo da linha é apresentado para o caso em que o BCS é reinserido antes da manobra de religamento e comparado ao caso em que o BCS não é reinserido. Conforme se observa, a reinserção do BCS não compromete o desempenho do chaveamento controlado. Sem a reinserção do BCS, a sobretensão máxima é de 1,70 pu, enquanto que quando a reinserção é considerada, este valor é de 1,72 pu.

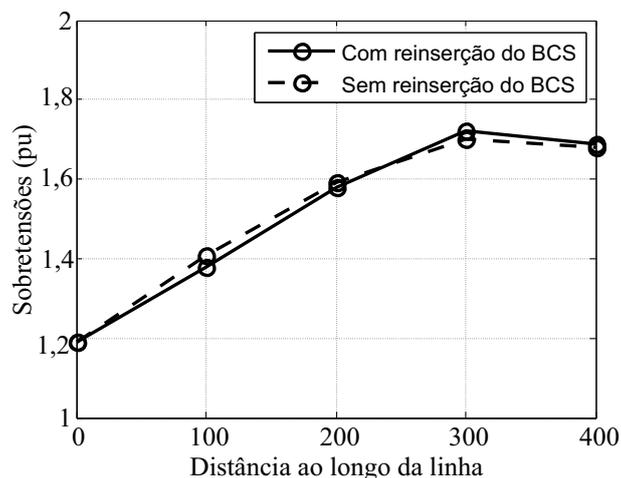


Figura 6.12. Perfil das sobretensões em linhas apenas com compensação série para o arranjo II para uma abertura trifásica devido a uma falta trifásica ABCT, considerando a reinserção do BCS antes da manobra de religamento.

Um caso de reinserção do BCS antes da manobra de religamento também é avaliado para linhas com ambos os tipos de compensação reativa. No Capítulo 4, foram apresentadas as

formas de onda da carga residual para o arranjo VI quando a linha é aberta devido a um defeito fase-fase CA, e o BCS é reinserido após a extinção da falta, Observou-se que o sinal na fase A é o mais afetado com a reinserção do BCS. Para avaliar o impacto dessa alteração, o perfil das sobretensões máximas ao longo da linha nos dois casos são comparados, como apresentado na Figura 6.13.

No caso em que a compensação série é retirada completamente e não é reinserida antes da manobra de religamento, a máxima sobretensão é de 1,64 pu. Quando a reinserção é realizada antes do religamento, logo após a extinção da falta, a sobretensão máxima é de 1,72 pu. Portanto, o impacto é mínimo.

Com os dois casos apresentados nesta seção, constata-se que quando o BCS é reinserido antes da manobra de religamento da linha, o impacto no desempenho do chaveamento controlado é mínimo. É importante ressaltar que a reinserção do BCS é realizada logo após a extinção da falta, e é considerado um intervalo de tempo após essa operação a fim de que na etapa de estimação do sinal de tensão do lado da linha, a alteração causada pela entrada da compensação série possa ser incluída no cálculo dos instantes de religamento.

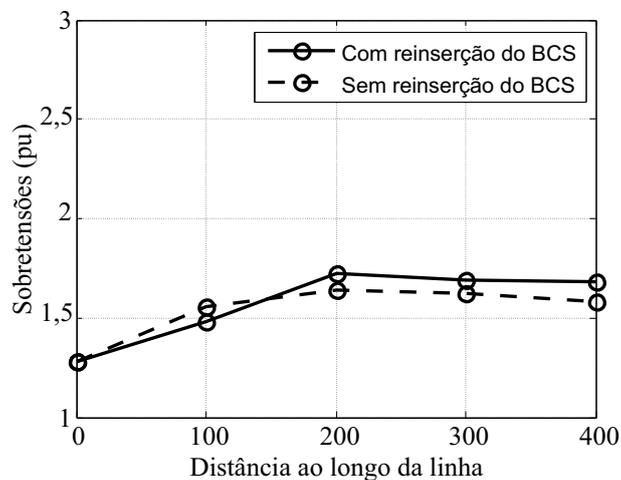


Figura 6.13. Perfil das sobretensões ao longo da linha para o arranjo VI para uma abertura trifásica devido a uma falta fase-fase CA, considerando a reinserção do BCS antes da manobra de religamento.

6.4 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Com os resultados apresentados neste capítulo, verificou-se a potencialidade da aplicação do chaveamento controlado para linhas com compensação série. Para linhas com reatores

em derivação e capacitores série, verificou-se a redução das sobretensões para todos os casos avaliados com o uso de uma técnica aplicada a linhas apenas com compensação em derivação (DANTAS *et al.*, 2008; DANTAS *et al.*, 2014). Para linhas apenas com compensação série, constatou-se que o método proposto neste trabalho apresenta melhores resultados que a técnica aplicada para linhas não compensadas (DANTAS *et al.*, 2008). Em todos os casos avaliados, as sobretensões de manobra foram reduzidas para valores menores que 2,0 pu. E quanto ao impacto da reinserção do BCS antes da manobra de religamento, verificou-se com os casos apresentados que o desempenho do chaveamento controlado não foi comprometido, visto que a estimação da carga residual é realizada após a reinserção do banco para o cálculo dos instantes ótimos para a manobra.

CONCLUSÕES

Nesta tese, apresentou-se o aprimoramento de técnicas de chaveamento controlado para linhas com compensação série a partir da avaliação das diversas condições de operação dos bancos de capacitores série (BCS) durante manobras de religamento de linha. Com isto, foram destacados os desafios e as potencialidades de tal aplicação. De acordo com o levantamento bibliográfico apresentado no Capítulo 3, as principais técnicas encontradas na literatura e aplicadas em campo são destinadas a linhas com compensação reativa em derivação ou não compensadas. No entanto, com a contínua expansão do sistema elétrico, a compensação série tem sido uma alternativa bastante atrativa para aumentar a capacidade de transmissão das linhas e melhorar a estabilidade do sistema. Neste contexto, avaliar a viabilidade de aplicação do chaveamento controlado em linhas com compensação série para redução de sobretensões de manobra é de grande interesse para o setor elétrico.

Em manobras de religamento, a presença da carga residual na linha é determinante para a definição de estratégias para estimar os instantes mais adequados para fechamento dos disjuntores. Deste modo, neste trabalho, apresentou-se uma análise da carga residual em linhas com compensação série, considerando as diversas condições de operação do BCS e principais configurações de compensação reativa. Observou-se que, quando o religamento se deve a uma abertura da linha sem ocorrência de falta, o BCS permanece em operação durante a manobra. Neste caso, devido à queda de tensão no capacitor série, a carga residual não se distribui uniformemente ao longo da linha. Enquanto que nos casos de religamento devido a uma falta, o BCS pode ser retirado de operação. Caso seja retirado completamente, a linha passa a ter as mesmas características de linhas não compensadas ou com compensação em derivação, a depender da configuração da compensação série. No entanto, se o BCS é mantido em operação, observa-se mais uma vez a distribuição não-uniforme ao longo da linha. Ou seja, a tensão do lado da linha vista no terminal local não é mesma vista no terminal remoto, e depende da localização do

BCS e das condições de falta.

Neste trabalho, mostrou-se que, a forma de onda da carga residual em linhas com compensação série se assemelha a da carga residual em linhas não compensadas e com compensação em derivação. Desta forma, verificou-se que técnicas existentes de chaveamento controlado podem ser usadas em linhas com compensação série. Para o caso de linhas com ambos os tipos de compensação reativa, técnicas aplicadas para linhas com compensação em derivação foram utilizadas. Enquanto que para linhas apenas com compensação série, foi proposto um novo método que se baseia na estimação da carga residual. Para isto, é necessário corrigir a tensão secundária do transformador de potencial capacitivo (TPC), visto que a carga residual é um sinal de tensão em corrente contínua. Logo, um filtro digital recursivo foi utilizado para esta finalidade.

De acordo com os resultados apresentados, constatou-se a potencialidade do chaveamento controlado quanto à redução das sobretensões em linhas com compensação série para todas as configurações avaliadas. Dentre os arranjos com ambos os tipos de compensação reativa, observaram-se as maiores sobretensões no esquema com um BCS no terminal local e reatores em derivação instalados em ambos os terminais da linha e após o banco (arranjo IV). No entanto, mesmo neste arranjo, o chaveamento controlado garante sobretensões menores que 2,0 pu.

Outro aspecto avaliado neste trabalho foi quanto ao impacto da reinserção do BCS após a extinção da falta. Observou-se que o impacto é maior nas fases envolvidas na falta devido à queda de tensão no capacitor série. Em linhas apenas com compensação série, a reinserção pode causar uma inversão na polaridade da carga residual, de modo que a tensão vista no terminal local pode ser negativa e no terminal remoto, positiva, ou vice-versa. Ao verificar a tensão sobre o disjuntor, que é o sinal de referência para o chaveamento controlado, observou-se que existe uma diferença entre os sinais vistos no terminal local e remoto, além da diferença na tensão do próprio terminal antes e após a reinserção do banco. No entanto, com a análise de alguns casos, constatou-se que esta operação não compromete a redução das sobretensões. Isto ocorre porque, após a reinserção do BCS, a estimação do sinal de tensão do lado da linha ainda é realizado por um intervalo de tempo a fim de considerar as alterações causadas por essa operação.

Com desenvolvimento deste trabalho, evidenciou-se a potencialidade do uso do chaveamento controlado em linhas com compensação série. Técnicas aplicadas em linhas com compensação em derivação e sem compensação foram utilizadas devido à similaridade da forma de onda dos sinais de referência, o que é determinante para a definição das estratégias adotadas. As sobretensões máximas ao longo da linha, em todos os casos, foram menores que 2,0 pu.

Com os resultados apresentados neste trabalho, as seguintes atividades são sugeridas para dar continuidade à pesquisa:

- Avaliar o desempenho do chaveamento controlado em linhas com compensação série para sistemas mais complexos;
- Avaliar o desempenho do chaveamento controlado a partir do monitoramento dos sinais de referência nos dois terminais da linha, visto que a carga residual pode não se distribuir uniformemente ao longo da linha;
- Implementar o sistema em um simulador em tempo real;
- Avaliar o impacto de componentes de frequência subsíncronas devido à presença dos capacitores série;
- Avaliar o desempenho do chaveamento controlado em linhas com bancos de capacitores controlados a tiristores (TCSC).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABB. *Controlled Switching, Buyer's & Application Guide*. 4. ed. Ludvika, Sweden, 2013.
- ANDERSON, P. M.; FARMER, R. G. *Series Compensation of Power Systems*. California, USA: PBLSH! Inc., 1996.
- ATEFI, M. A.; SANAYE-PASAND, M. Improving Controlled Closing to Reduce Transients in HV Transmission Lines and Circuit Breakers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 28, n. 2, p. 733–741, 2013.
- BARROS, D. D. L. T. *Influência da Suportabilidade Dielétrica de Disjuntores em Manobras Controladas de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Julho 2013.
- BARROS, D. D. L. T.; DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D. Representação de Disjuntores em Manobras Controladas de Linhas de Transmissão. *Décimo Sexto Encuentro Iberoamericano de Cigré - XVI ERIAC, Puerto Iguazú, Argentina, Puerto Iguazú, Argentina, Maio 2015*.
- BARROS, D. D. L. T.; NEVES, K. M. C.; JR., D. F.; FONSECA, L. Controlled Switching of Transmission Line with Series Compensation. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, June 2015.
- BUNOV, P.; KLINGBEIL, L.; SCHUBERT, M.; GOSSLER, B.; BISWAS, D.; HUNT, J.; THALLAM, R.; KERI, A. J. F. Transmission Line Arresters Application for Control of Switching Overvoltages on 500-kV Transmission Line. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*, p. 1–5, 2014.
- CIGRE Working Group 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Guide for Application Lines, Reactors, Capacitors, Transformers - 1st Part. *ELECTRA*, n. 183, p. 42–73, April 1999.
- CIGRE Working Group 13.07. Controlled Switching of HVAC Circuit-Breakers-Planning, Specification and Testing of Controlled Switching Systems. *ELECTRA*, v. 197, p. 23–33, August 2011.
- CIGRE Working Group A3.07. Controlled Switching: non-conventional applications. *ELECTRA*, n. 214, p. 29–38, June 2004.
- CIGRE Working Group A3.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Benefits & Economic Aspects. January 2004.
- CIGRE Working Group A3.07. Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers. Guidance for further applications including unloaded transformer switching, load and fault interruption and circuit breaker uprating. n. 263, p. 56, December 2004.

- COLCLASER, R.; WAGNER, C.; DONOHUE, E. Multistep Resistor Control of Switching Surges. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-88, n. 7, p. 1022 – 1028, July 1969. ISSN 0018-9510.
- D'AJUZ, A.; FONSECA, C. S.; CARVALHO, F. M. S.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; ESMERALDO, P. C. V.; VAISMAN, R.; FRONTIN, S. de O. *Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamentos - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta-Tensão*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1987.
- D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; KASTRUP FILHO, O.; MORAIS, S. de A. *Equipamentos elétricos - especificação e aplicação em subestações de alta tensão*. Niteroi, Rio de Janeiro: FURNAS, Universidade Federal Fluminense/EDUFF, 1985.
- DANTAS, K. M. C.; FERNANDES Jr., D.; NEVES, W. L. A.; SOUZA, B. A.; FONSECA, L. C. A. Mitigation of Switching Overvoltages in Transmission Lines via Controlled Switching. *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, Pittsburgh, Pennsylvania USA, July 2008.
- DANTAS, K. M. C.; MACHADO, E. P.; NEVES, W. L. A.; FONSECA, L. C. A. Recursive Digital Filters Design to Compensate CVT Frequency Response: An Application for Transmission Line Controlled Switching. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Cavtat, Croatia, June 2015.
- DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D. An Approach for Controlled Reclosing of Shunt-Compensated Transmission Lines. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 29, n. 3, p. 1203–1211, 2014.
- DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; FERNANDES Jr., D.; CARDOSO, G. A.; FONSECA, L. C. A. Real Time Implementation of Transmission Line Controlled Switching. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Delft, The Netherlands, June 2011.
- DUBE, L. *Models in ATP: Language Manual*. [S.l.], 1996.
- EPE; ONS; CCEE. *1ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2018-2022*. [S.l.], 2018.
- FROEHLICH, K.; HOELZL, C.; STANEK, M.; CARVALHO, A. C.; HOFBAUER, W.; HOEGG, P.; AVENT, B. L.; PEELO, D. F.; SAWADA, J. H. Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part I: Closing Control Device Development. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 734–740, April 1997.
- FROEHLICH, K.; HOELZL, C.; STANEK, M.; CARVALHO, A. C.; HOFBAUER, W.; HOEGG, P.; AVENT, B. L.; PEELO, D. F.; SAWADA, J. H. Controlled Closing on Shunt Reactor Compensated Transmission Lines. Part II: Application of Closing Control Device for High-Speed Autoreclosing on BC Hydro 500 kV Transmission Line. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 12, n. 2, p. 741–746, April 1997.
- GARZON, R. D. *High Voltage Circuit Breakers: Design and Applications*. New York, NY - USA: Marcel Dekker, Inc., 1997.

- GREGORY, R. C. F. *Análise Computacional do Desempenho de Estratégia para o Religamento Controlado de Linhas de Transmissão*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, 2016.
- GREGORY, R. C. F.; SANTOS, A. C.; OLIVEIRA, J. C.; CHAVES, M. L. R.; DANTAS, K. M. C.; NEVES, W. L. A.; JUNIOR, D. F.; FONSECA, L. C. A. Performance analysis of controlled reclosing procedure of transmission lines under non-ideal conditions. *IEEE Latin America Transactions*, IEEE, v. 16, n. 4, p. 1164–1171, 2018.
- GRUNBAUM, R.; INGESTROM, G.; EKEHOV, B.; MARAIS, R. 765 kV Series Capacitors for Increasing Power Transmission Capacity to the Cape Region. *Power Engineering Society Conference and Exposition (PowerAfrica)*, Johannesburg, South Africa, p. 1–8, July 2012.
- IBRAHIM, A. I.; DOMMEL, H. W. A Knowledge Base for Switching Surge Transients. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Montreal, Canada, June 2005.
- IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules. *IEEE Std C62.82.1-2010 (Revision of IEEE Std 1313.1-1996)*, p. 1–22, April 2011.
- IEEE Std C37.104-2002. *IEEE Guide for Automatic Reclosing of Line Circuit Breakers for AC Distribution and Transmission Lines*. New York, USA, 2003.
- IEEE Working Group on Switching Surges. Switching Surges: Part IV-Control and Reduction on AC Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-101, n. 8, p. 2694–2702, August 1982.
- ILICETO, F.; CINIEMI, E. Comparative Analysis of Series and Shunt Compensation Schemes for AC Transmission Systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, v. 96, n. 6, p. 1819–1830, 1977.
- ITO, H. Controlled Switching Technologies, State-of-the-Art. *Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific, IEEE/PES*, 2002.
- KIRSCHNER, L.; LIMA, M. C.; FERNANDES, J. E. C.; MUNCHMEIER, R. Benefits and design aspects of Sao Joao do Piaui 500 kV series capacitors. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, p. 17–21, 2004.
- KOHYAMA, H.; WADA, K.; ITO, H.; HIDAKA, M.; BILLINGS, S.; SUGIYAMA, T.; YAMAMOTO, H. Development of 550 kv and 362 kv synchronous switching gas circuit breakers. In: IEEE. *Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2001 IEEE/PES*. [S.l.], 2001. v. 1, p. 597–602.
- KRUSI, U.; FROHLICH, K. J. Controlled switching-suitability check for already-installed HVAC circuit breakers. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Asia Pacific*, p. 813–817, 2002.
- KUMAR, A.; PARTHASARATHY, K.; PRABHAKARA, F. S.; KHINCHA, H. P. Effectiveness of Series Capacitors in Long Distance Transmission Lines. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, IEEE, n. 5, p. 941–951, 1970.
- LEGATE, A. C.; BRUNKE, J. H.; RAY, J. J.; YASUDA, E. J. Elimination of Closing Resistors on EHV Circuit Breakers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 3, n. 1, p. 223–231, January 1988.

- LIMA, M. C.; ALVES, F. R.; HENSCHER, S.; KIRSCHENER, L.; BATTERMANN, M. Estudos Complementares para Avaliação de Transitórios Associados à Operação de Bancos de Capacitores Série em 500kV. *VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Santos, Brasil*, Santos, Brasil, agosto 2007.
- LIMA, M. C.; ALVES, F. R.; OLIVEIRA, A. L.; SILVA, L. P.; LEMES, M. N.; QUIRANTE, R. Aplicação de Bancos de Capacitores Série na Transmissão CA de Longa Distância: o Exemplo da Interligação de Tucuruí-Macapá-Manaus. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, Goiânia, Brasil, Maio 2012.
- MACHADO, E. P. *Compensação Dinâmica dos Transitórios de Baixa Frequência de Transformadores de Potencial Capacitivo para Otimização da Proteção de Linhas de Transmissão*. Tese (Doutorado) — Federal University of Campina Grande, Campina Grande, Brazil, 2013.
- MERCIER, A.; CARUFEL, S. D.; FILION, Y.; PORTALES, E.; CARON, J.; TAILLEFER, P. Upgrading HVAC circuit breakers using controlled switching: Hydro-Québec's 20 year experience. *IEEE PES T&D Conference and Exposition*, 2014.
- MESTAS, P.; TAVARES, M. C.; GOLE, A. M. Parametric Analysis of Three-Phase Autoreclosing Method for Compensated Transmission Lines. *International Conference on Power Systems Transients (IPST)*, Delft, the Netherlands, June 2011.
- MESTAS, P.; TAVARES, M. C.; GOLE, A. M. Real Time Digital Simulation to Performance Evaluation of an Adaptive Three-Phase Autoreclosing Method for Compensated Transmission Lines. *Power Systems Computation Conference (PSCC)*, Stockholm, Sweden, August 2011.
- ONS. *Procedimentos de Rede - Submódulo 23.3. Diretrizes e critérios para estudos elétricos*. [S.l.], 2010.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. *IET generation, transmission & distribution*, IET, v. 2, n. 4, p. 588–599, 2008.
- PEREIRA, M. P. *Ferroressonância em Sistemas Elétricos de Potência*. [S.l.]: Furnas Centrais Elétricas, 2008.
- RIBEIRO, J. R.; MCCALLUM, M. E. An Application of Metal Oxide Surge Arresters in the Elimination of Need for Closing Resistors in EHV Breakers. *IEEE Transaction on Power Delivery*, v. 4, n. 1, p. 282–291, January 1989.
- ROCHA, R.; CARVALHO, A. C.; TÁVORA, J. L. Manobra controlada: Modelagem da suportabilidade dielétrica do disjuntor durante a operação de fechamento. *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, Belém, Brasil, 1997.
- SANDOVAL, N.; MOLINA, A.; PETERSSON, A.; STROMBERG, G.; SAMUELSSON, J. Introduction of Series Capacitors in the Venezuelan EHV-grid. *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America*, p. 1–6, 2006.
- SEYEDI, H.; TANHAEIDILMAGHANI, S. New controlled switching approach for limitation of transmission line switching overvoltages. *IET Generation, Transmission & Distribution*, IET, v. 7, n. 3, p. 218–225, 2013.

- SIEMENS. *High-Voltage Circuit-Breakers: Trends and Recent Developments*. Erlangen, Germany, 2011.
- WALLNER, C.; RICHTER, H. G. Three-Pole Controlled Auto-Reclosing of Shunt Compensated Transmission Lines. *The 16th Conference of the Electric Power Supply Industry*, Mumbai, India, November 2006.