

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

VICTOR BELTRÃO TELLÓ

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO
TRANSITÓRIOS DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES
NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA:
Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Resultantes da Energização e
Desenergização de Bancos de Capacitores em Derivação

Porto Alegre

2016

VICTOR BELTRÃO TELLÓ

**TRANSITÓRIOS DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES
NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA:
Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Resultantes da Energização e
Desenergização de Bancos de Capacitores em Derivação**

Projeto de diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Porto Alegre

2016

CIP - Catalogação na Publicação

Telló, Victor Beltrão

Transitórios devido ao chaveamento de bancos de capacitores no sistema elétrico de potência: análise de sobretensões e sobrecorrentes transitórias resultantes da energização e desenergização de bancos de capacitores em derivação / Victor Beltrão Telló. -- 2016.

115 f.

Orientador: Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Elétrica, Porto Alegre, BR-RS, 2016.

1. Transitórios eletromagnéticos. 2. Bancos de capacitores em derivação. 3. Sobretensões transitórias. 4. Sobrecorrentes transitórias. 5. Sistemas de distribuição. I. Loureiro, Luiz Tiarajú dos Reis, orient. II. Título

VICTOR BELTRÃO TELLÓ

**TRANSITÓRIOS DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES
NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA:**

**Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Resultantes da Energização e
Desenergização de Bancos de Capacitores em Derivação**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro

Prof. Dr. Ály Flores Ferreira Filho

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Gladis Bordin – UFRGS _____

Eng. Felipe Patrício de Souza – Siemens Ltda. _____

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro – UFRGS _____

Aos meus pais, Marcos e Rachel, pelo amor incondicional, pelo incentivo aos estudos e pelo apoio nas horas mais difíceis.

À Carina, minha companheira de todas as horas, por seu amor, amizade, carinho e por sempre acreditar no meu potencial, me mantendo na direção certa em busca dos meus objetivos.

AGRADECIMENTOS

À minha família, pais e irmãos, pessoas que me deram todo o amor e o suporte necessário para que eu pudesse vencer as etapas de minha vida acadêmica. Principalmente aos meus pais e minha dinda Sandra, pelo incentivo e ajuda nos estudos, e às minhas avós, Sibila (*in memoriam*) e Dalva, pelo exemplo de vida e superação das adversidades.

À minha noiva Carina, meu porto seguro, por me mostrar a força de um amor verdadeiro e por estar ao meu lado em todos os momentos, sendo sempre a minha melhor amiga, minha companheira para tudo e minha confidente. Teu apoio e, principalmente, teu amor fizeram toda a diferença durante este árduo e longo caminho percorrido.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, que nunca mediu esforços para me guiar durante o desenvolvimento deste trabalho e que me deu a liberdade de criação intelectual para a preparação do mesmo.

A toda minha família, em especial aos meus dindos Lisa e Moacir, aos meus tios Volmi, Sílvia e Mara e aos meus primos-irmãos José, Maurício e Leandro, pelo apoio incondicional e pelo amor e amizade sincera.

À família de minha noiva, em especial, aos meus sogros, Antônio e Carla, pelo carinho, apoio e amizade.

A todos os meus grandes amigos do curso de Engenharia Elétrica, com os quais eu partilhei sorrisos e lamentações, vitórias e derrotas e, sobretudo, um carinho e uma amizade verdadeira. Em especial, aos meus irmãos (que a vida me deu) da turma 09/1 que sempre estiveram ao meu lado.

A todos os meus grandes amigos da Siemens e aos ex-colegas de trabalho, pela força e pelo incentivo que me deram e, principalmente, pela amizade verdadeira e por compartilharem comigo os seus conhecimentos e sabedorias. Em especial, gostaria de agradecer aos Engenheiros Felipe, Márcio, Piccoli e Seifert pela oportunidade que me deram e por acreditarem no meu trabalho e no meu potencial.

Aos meus amigos de colégio, Guilherme, Mário e Luz, pela amizade duradoura e pelas risadas, churrascos e mates compartilhados.

Aos meus amigos do futsal de quinta pelos momentos de descontração.

A todas as pessoas que não foram mencionados aqui, mas que de alguma maneira contribuíram e fizeram parte desta caminhada.

“Se engana quem acha que se formará no curso de Engenharia Elétrica sem a ajuda de amigos. Este curso exigirá muito de vocês e para serem bem sucedidos aqui, todos vocês devem nutrir uma amizade verdadeira, pois em algum momento, durante a graduação, será necessário contar com um amigo de verdade para superar os obstáculos impostos.”

Professor Alberto Bastos do Canto Filho

(Discurso de boas-vindas aos calouros do curso de Engenharia Elétrica da UFRGS, primeiro semestre de 2009)

RESUMO

A utilização de bancos de capacitores em derivação para regulação de tensão e correção do fator de potência é uma metodologia efetiva para o controle dos reativos presentes no sistema de potência. Estes reativos, gerados por cargas indutivas, são compensados através da inserção de potência reativa capacitiva por parte dos bancos. Entretanto, no instante em que um banco de capacitores é manobrado, entrando em operação, ocorrem sobretensões e sobrecorrentes transitórias de elevadas magnitudes. Estes transitórios, se não forem previamente estudados, podem acarretar em problemas de funcionamento dos equipamentos instalados próximos ao banco, além de danos aos isolamentos. Neste trabalho é feita uma análise dos comportamentos transitórios decorrentes da energização e desenergização de bancos únicos de capacitores e de bancos em contraposição. Para isto, são estudados modelos matemáticos com o intuito de se quantificar as magnitudes destas tensões e correntes transitórias. Ainda, são realizadas simulações, em programa de transitórios eletromagnéticos (EMTP/ATP), das principais condições de manobra de bancos de capacitores em sistemas de distribuição. Além disso, é analisada a eficácia do método de chaveamento controlado como forma de mitigar estes distúrbios transitórios.

Palavras-chave: Banco de capacitores em derivação. Chaveamento de banco de capacitores. Sobretensão transitória. Sobrecorrente transitória. ATPDraw.

ABSTRACT

The usage of capacitor banks for voltage regulation and power factor correction is an effective method to control the reactive power present in the power system. These reactives, generated by inductive loads, are compensated through the insertion of capacitive reactive power by banks. However, at the moment that a capacitor bank is switched, going into operation, high transients' overvoltages and overcurrent occurs. These transitories, if not previously studied, may result in malfunction of the equipment installed near to the bank, as well as damages to the insulation. This paper presents an analysis of transient behavior arising from energization and de-energization of a single and a back-to-back capacitor banks. For this, mathematic models are studied in order to quantify the magnitude of these transients' voltages and currents. Besides, are performed, in electromagnetic transient program (EMTP/ATP), simulations of the main conditions of capacitor banks switching in distribution systems. Furthermore, is analyzed the effectiveness of controlled switching method as a way to mitigate these transient disturbances.

Keywords: Shunt capacitor bank. Capacitor bank switching. Transient overvoltage. Transient overcurrent. ATPDraw.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolução do tamanho e uso dos capacitores no sistema elétrico.....	22
Figura 2: Elementos construtivos de um capacitor individual.	23
Figura 3: Evolução do material dielétrico de elementos capacitivos.	23
Figura 4: Diagrama de um banco de capacitores.	28
Figura 5: Diagrama de uma unidade capacitiva.	28
Figura 6: Capacitores de potência com fusível externo.	30
Figura 7: Capacitores de potência com fusível interno.	32
Figura 8: Capacitores de potência sem fusível (<i>fuseless</i>).....	33
Figura 9: Ligação de banco de capacitores em delta e duplo delta	34
Figura 10: Ligação de banco de capacitores em estrela aterrada e dupla estrela aterrada.	36
Figura 11: Ligação de banco de capacitores em estrela isolada e dupla estrela isolada.	37
Figura 12: Principais condições transitórias de manobra de bancos de capacitores.	39
Figura 13: Diagrama de um circuito RL.	43
Figura 14: Corrente alternada assimétrica dada pela Equação (8).	45
Figura 15: Diagrama de um circuito RLC.....	46
Figura 16: Diagrama de um circuito LC.	48
Figura 17: Relação existente entre a tensão e a corrente em um circuito LC.	51
Figura 18: Energização de bancos de capacitores em contraposição (<i>back-to-back</i>).	51
Figura 19: Circuito equivalente para bancos de capacitores em contraposição (<i>back-to-back</i>).	52
Figura 20: Circuito com dois capacitores conectados em contraposição (<i>back-to-back</i>).	54
Figura 21: Circuito equivalente ao primeiro evento transitório.	54
Figura 22: Circuito equivalente ao segundo evento transitório.....	55
Figura 23: (a) Diagrama de um banco de capacitores trifásico. (b) Relação fasorial quando I_A passa por zero.	57
Figura 24: (a) Diagrama fasorial quando as correntes das fases B e C atingem o zero. (b) Tensão retida no capacitor (fases B e C interrompidas).	58
Figura 25: (a) Circuito equivalente de um banco de capacitores trifásicos com a ocorrência de um reacendimento de arco no disjuntor. (b) Excursão de tensão após a ocorrência de um <i>restrike</i> devido ao chaveamento de um banco trifásico.....	61
Figura 26: Modelo de circuito com resistores de pré-inserção.	65

Figura 27: (a) Instante ótimo de chaveamento controlado de um banco de capacitores aterrado. (b) Instante ótimo de chaveamento controlado de um banco de capacitores não aterrado.	67
Figura 28: Topologia do sistema de distribuição proposto.	71
Figura 29: Circuito simulado para o caso base (sem bancos de capacitores instalados).	74
Figura 30: Simulação das tensões nas três fases da barra 632.	75
Figura 31: Simulação das tensões nas três fases da barra 634.	76
Figura 32: Simulação das correntes nas três fases da barra 632.	77
Figura 33: Simulação das correntes nas três fases da barra 634.	77
Figura 34: Circuito simulado para o caso 1 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 632 sem a existência do banco no barramento 634.	80
Figura 35: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).	82
Figura 36: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).	82
Figura 37: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).	84
Figura 38: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).	84
Figura 39: Circuito simulado para o caso 2 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 632 com a existência do banco fixo no barramento 634.	85
Figura 40: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	87
Figura 41: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	87
Figura 42: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	88
Figura 43: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	88

Figura 44: Circuito simulado para o caso 3 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 634 sem a existência do banco no barramento 632.	90
Figura 45: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).	91
Figura 46: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).	92
Figura 47: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).	93
Figura 48: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).	94
Figura 49: Circuito simulado para o caso 4 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 634 com a existência do banco fixo no barramento 632.	95
Figura 50: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	97
Figura 51: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	97
Figura 52: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	98
Figura 53: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	98
Figura 54: Circuito simulado para a utilização do método de chaveamento controlado – conexão e desconexão controlada dos capacitores na barra 632 com a existência do banco fixo no barramento 634.	100
Figura 55: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	102
Figura 56: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	102

Figura 57: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	103
Figura 58: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	104

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Tensões de regime permanente de longa duração para bancos de capacitores.....	25
Quadro 2: Limites superiores das faixas de variação de temperatura para bancos de capacitores.....	26
Quadro 3: Dados dos segmentos das linhas de transmissão.....	72
Quadro 4: Dados das cargas.....	72
Quadro 5: Dados dos transformadores.....	72
Quadro 6: Tensões nominais nas barras 632 e 634, sem bancos de capacitores instalados....	75
Quadro 7: Correntes nominais nas barras 632 e 634, sem bancos de capacitores instalados.	76
Quadro 8: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).....	81
Quadro 9: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).....	81
Quadro 10: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).....	83
Quadro 11: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).....	83
Quadro 12: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.....	85
Quadro 13: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.....	86
Quadro 14: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.....	86
Quadro 15: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.....	86
Quadro 16: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).....	90
Quadro 17: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).....	91
Quadro 18: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).....	92

Quadro 19: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).....	93
Quadro 20: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	95
Quadro 21: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	96
Quadro 22: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	96
Quadro 23: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.	96
Quadro 24: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	101
Quadro 25: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	101
Quadro 26: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	103
Quadro 27: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.	103
Quadro 28: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase A para os casos estudados.	105
Quadro 29: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase A para os casos estudados.	106
Quadro 30: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase B para os casos estudados.	107
Quadro 31: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase B para os casos estudados.	108
Quadro 32: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase C para os casos estudados.	109
Quadro 33: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase C para os casos estudados.	110

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
1.1 OBJETIVO	19
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2 BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO.....	21
2.1 HISTÓRICO CONSTRUTIVO.....	21
2.2 NORMAS TÉCNICAS	24
2.2.1 Ensaios	26
2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS.....	27
2.3.1 Classificação de Bancos de Capacitores	29
2.3.1.1 Bancos de Capacitores com Fusível Externo	30
2.3.1.2 Bancos de Capacitores com Fusível Interno	31
2.3.1.3 Bancos de Capacitores sem Fusível (<i>Fuseless</i>).....	32
2.4 ESQUEMAS DE LIGAÇÃO	33
2.4.1 Esquema de Ligação em Delta.....	33
2.4.2 Esquema de Ligação em Estrela Aterrada.....	34
2.4.3 Esquema de Ligação em Estrela com Neutro Isolado	36
3 TRANSITÓRIOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA.....	38
3.1 TRANSITÓRIOS DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES	38
3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS TRANSITÓRIOS DEVIDOS AO CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES	42
3.2.1 Análise de Transitórios em Circuitos RL	43
3.2.2 Análise de Transitórios em Circuitos RLC	46
3.2.3 Análise de Transitórios em Circuitos LC	47
3.2.4 Análise de Transitórios de Bancos de Capacitores em <i>Back-to-Back</i>	51
3.2.5 Análise de Transitórios em Bancos de Capacitores Trifásicos.....	56
3.3 MÉTODOS DE CONTROLE DAS SOBRETENSÕES E SOBRECORRENTES TRANSITÓRIAS ENVOLVENDO BANCOS DE CAPACITORES	63
3.3.1 Resistores ou Indutores de Pré-inserção	64
3.3.2 Reatores Limitadores ou de Amortecimento	65
3.3.3 Chaveamento Controlado (Sincronizado)	66

3.4 INFLUÊNCIA DOS TRANSITÓRIOS NOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DECORRENTES DA INSTALAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES	68
3.4.1 Disjuntores	68
3.4.2 Seccionadores.....	69
3.4.3 Transformadores de Corrente (TC)	69
3.4.4 Para-raios	69
4 SIMULAÇÃO DE EVENTOS TRANSITÓRIOS DEVIDO ÀS MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO.....	71
4.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PROPOSTO - SEM BANCOS DE CAPACITORES CONECTADOS	74
4.2 ANÁLISE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PROPOSTO - COM BANCOS DE CAPACITORES CONECTADOS	77
4.2.1 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 1	79
4.2.2 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 2	84
4.2.3 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 3	89
4.2.4 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 4	94
4.2.5 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – Método de Chaveamento Controlado (Sincronizado)	99
4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CASOS ESTUDOS	104
4.3.1 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase A	105
4.3.2 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase B	107
4.3.3 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase C	109
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	111
5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	112
REFERÊNCIAS	113

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se debatido fortemente a qualidade de energia fornecida pelas concessionárias públicas e privadas e como os consumidores estão sendo afetados por esta. Uma das formas encontradas para se diminuir os custos e otimizar o desempenho do sistema elétrico é a instalação de grandes blocos de compensação reativa capacitiva.

Segundo D’Ajuz (1985), o principal objetivo desta compensação é corrigir o fator de potência das cargas, sendo isto possível através do uso de: geradores, linhas de transmissão, compensadores síncronos, compensadores estáticos (controlados por tiristores) e bancos de capacitores.

Devido ao menor custo instalação e maior simplicidade de manutenção, a utilização de bancos de capacitores, dentre os equipamentos mencionados, vêm sendo priorizada. Deste modo, a instalação de bancos de capacitores em derivação (*shunt*) vem aumentando com o passar do tempo, principalmente, em pontos estratégicos do sistema e em diferentes níveis de tensão (FRONTIN *et al.*, 2013).

Ainda, segundo Johnson (1964) e D’Ajuz (1985), os principais benefícios da utilização de bancos de capacitores, tanto em sistemas de transmissão e distribuição, quanto em instalações industriais, são:

- Controle e regulação de tensão (desde que os capacitores sejam manobrados corretamente);
- Correção do fator de potência;
- Elevação da capacidade da rede;
- Redução de perdas;
- Redução do consumo de energia;
- Filtragem de harmônicos, quando da utilização de bancos na forma de filtros passivos.

Apesar das vantagens que a instalação de bancos de capacitores promove no sistema de potência, sua aplicação necessita de diversos cuidados e estudos prévios. Isto se deve pelo fato da operação de chaveamento destes equipamentos provocar distúrbios transitórios oscilatórios nas redes elétricas. Além disso, sabe-se que o

número de manobras diárias dos bancos de capacitores pode vir a ser muito elevado, dependendo da curva de carga dos sistemas aos quais estão conectados.

Isto faz com que o estudo dos eventos transitórios decorrentes do chaveamento de bancos de capacitores seja de fundamental importância, uma vez que as sobretensões e sobrecorrentes geradas podem causar sérios danos aos equipamentos presentes no sistema. Esses danos podem acarretar em desgastes prematuros dos dispositivos de manobra (disjuntores ou seccionadores), além de limitar a vida útil dos demais equipamentos.

1.1 OBJETIVO

O objetivo geral deste trabalho é analisar os transitórios causados pelo chaveamento de bancos de capacitores *shunt* em sistemas de distribuição.

Para isto, foram desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Estudar as tensões e correntes transitórias decorrentes da energização e desenergização de bancos, a partir das principais condições de manobra, a saber: o chaveamento de bancos únicos de capacitores e de bancos em contraposição (*back-to-back*);
- Realizar uma análise quantitativa através da modelagem matemática de circuitos R, L e C. Estes circuitos são representativos das situações de manobra encontradas em sistemas reais.

Ainda, o método utilizado para atingir os objetivos do presente trabalho foi a realização de uma pesquisa quantitativa. Desta forma, foi utilizado o programa computacional *ATPDraw*[®] (*Alternative Transient Program*) para simular as magnitudes dos transitórios num sistema de distribuição baseado no IEEE 13 *Buses Test Feeder* (2004). Nesta etapa do trabalho, são estudados quatro casos diferentes de conexão e desconexão de bancos de capacitores do sistema, considerando que estes equipamentos são instalados numa subestação da empresa distribuidora local e no barramento de um consumidor sensível. E, por último é simulado, para o pior caso, a mitigação de transitórios pelo método de chaveamento controlado.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Além deste capítulo introdutório, o presente estudo está dividido da seguinte maneira:

- No capítulo 2 faz-se um breve relato histórico da aplicação de bancos de capacitores em sistemas elétricos, além de descrever construtivamente as unidades capacitivas que compõem estes bancos. Ainda são apresentados conceitos sobre a proteção de bancos de capacitores (uso ou não de fusíveis) e sobre os tipos de ligações encontradas no sistema;
- No capítulo 3 é apresentada a formulação matemática dos transitórios originados durante a manobra de bancos de capacitores. Além disso, são descritas as principais formas de se mitigar esses distúrbios, bem como a influência da instalação de bancos de capacitores na especificação dos demais componentes do circuito;
- No capítulo 4 são realizadas as simulações de chaveamentos dos bancos de capacitores e, a partir destas, são quantificadas e as sobretensões e sobrecorrentes transitórias. Ainda, é efetuada a modelagem de um sistema contendo dispositivos de manobra controlada, com o intuito de se mostrar a mitigação dos eventos transitórios.
- No capítulo 5 são expostas as considerações finais deste trabalho e são apresentadas algumas propostas de continuidade do mesmo.

2 BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO

O presente capítulo contextualiza a utilização dos bancos de capacitores no Sistema Elétrico de Potência. Inicialmente, faz-se um breve relato referente ao processo construtivo dos capacitores e a evolução das tecnologias empregadas nestes. Após, são apresentadas as normas vigentes que regem a construção, aplicação e instalação dos bancos nos sistemas de distribuição e transmissão. Ainda, são descritas as configurações existentes para os bancos de capacitores (fusível externo, fusível interno ou sem fusível) e os métodos de ligações utilizados nos mesmos.

2.1 HISTÓRICO CONSTRUTIVO

A utilização de banco de capacitores teve seu início datado no ano de 1914, com o intuito de corrigir o fator de potência nas plantas fabris, conforme descrito por Johnson (1964). A forma construtiva destes primeiros capacitores fazia uso de papel impregnado com cera para servir como dielétrico, o que tornava esta solução extremamente grande e pesada. Ainda, naquela época, o custo por kVAr era altíssimo, comprometendo assim a sua aplicação a casos específicos.

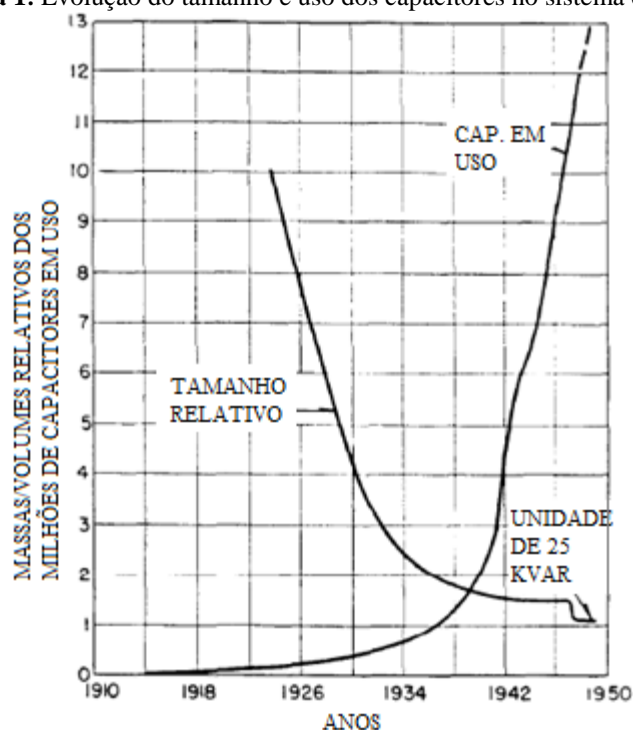
Além disso, devido à baixa qualidade dos materiais utilizados, eram frequentes os casos de descargas parciais no dielétrico, o que contribuía com a redução da vida útil do equipamento e prejudicava a confiabilidade do mesmo. Ademais, em bancos de capacitores de alta potência, as perdas de potência ativa eram superiores às reativas e, por conseguinte, esta aplicação era inviável à época.

A partir da década de 1930, com a criação do papel Kraft e a substituição da cera por óleos vegetais no processo de impregnação, possibilitaram-se as reduções de tamanho e preço da solução. Mais tarde, os óleos vegetais foram substituídos por outro líquido impregnante, o PCB (*polychlorinated biphenyls*), também conhecido como ascarel (pentaclorodifenil). Este material isolante, devido à sua maior constante dielétrica, elevada suportabilidade aos estresses elétricos, estabilidade térmica e ao fato de não ser inflamável, permitiu a disseminação do uso de banco de capacitores em subestações industriais, principalmente nas horas de pico do sistema (NATARAJAN, 2005). Contudo, até 1937, praticamente todos os capacitores instalados nas plantas industriais eram de uso abrigado (*indoor*). Desta forma, eram

necessários diversos acessórios para sua instalação (como por exemplo, o uso de estruturas em aço), o que mantinha a solução ainda cara.

Apenas em 1939, com o surgimento de soluções de uso ao tempo (*outdoor*) e a eliminação destes acessórios, é que os custos de fabricação dos capacitores foram reduzidos. Isto ocorreu quase na mesma proporção que a diminuição do peso da solução. Devido a estes fatos, fez-se possível a proliferação do uso desses bancos nas concessionárias de energia. Este fenômeno do crescimento da utilização dos capacitores no sistema elétrico pode ser observado na Figura 1.

Figura 1: Evolução do tamanho e uso dos capacitores no sistema elétrico.



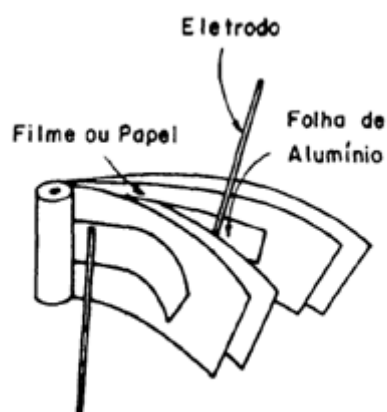
Fonte: Adaptado pelo autor de JOHNSON (1964, p. 234).

Apesar das constantes evoluções construtivas, até o início da década de 1960 as perdas dielétricas correspondiam ao dobro da potência reativa fornecida pelos capacitores (CICHANOWSKI e NEWCOMB, 1991). Com isto, estes eram limitados termicamente à potência máxima de 100 kVAr. Devido a essas perdas, ocorria a deterioração da capacidade dielétrica dos capacitores, uma vez que surgiam pontos de elevada temperatura nos equipamentos. Além disso, conforme descrito por Gonën (1986), as falhas do material dielétrico originavam arcos

internos no equipamento, provocando o rompimento dos invólucros através da emissão de gases.

Atualmente, as unidades capacitivas aplicadas no sistema elétrico são constituídas por papéis ou filmes dielétricos de polipropileno (ao invés do papel Kraft) ou folhas de alumínio e produtos impregnantes. Estas tecnologias apresentam perdas dielétricas menores e uma maior suportabilidade ao estresse elétrico, quando comparadas ao ascarel. Além disso, devido às características adversas à saúde e ao ambiente, tornou-se necessária a substituição do ascarel por líquidos de impregnação biodegradáveis. Como por exemplo, pode-se citar o uso do impregnanante de nome químico isopropildifenil (D'AJUZ, 1985). A Figura 2 mostra como é formado um elemento capacitivo presente em capacitores de potência nos dias atuais.

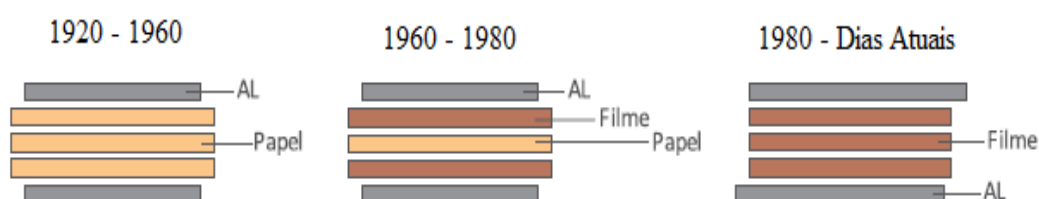
Figura 2: Elementos construtivos de um capacitor individual.



Fonte: D'Ajuz (1985, p. 228).

Na Figura 3 está representada a evolução, ao longo das décadas, das tecnologias construtivas dos elementos capacitivos.

Figura 3: Evolução do material dielétrico de elementos capacitivos.



Fonte: Adaptado pelo autor de Frontin *et al.* (2013, p. 635).

2.2 NORMAS TÉCNICAS

Existem diversas normas técnicas referentes aos capacitores de potência com o intuito de orientar o responsável pela especificação. A seguir, são apresentadas as principais normas aplicadas às unidades capacitivas e bancos de capacitores:

- **ABNT NBR 5282 (1998)** – Capacitores de Potência em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal acima de 1000 V - Especificação;
- **ABNT NBR 12479** – Capacitores de Potência – Características Elétricas e Construtivas;
- **ABNT NBR 5289 (1992)** – Capacitores de Potência – Métodos de Ensaio;
- **ANSI C55.1** – Shunt Power Capacitors;
- **ANSI C37.0731 (1973)** – Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis;
- **ANSI C37.66** – Requirements for Oil Filled Capacitor Switches for Alternating Current Systems;
- **NEMA Std. Pub. CP 1-2000** – *Shunt Capacitors*;
- **IEEE Std. 18-2002** – Standard for Shunt Power Capacitors;
- **IEEE Std. 1036** – IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors;
- **IEC 60871-1** – Shunt Capacitors for AC Power Systems – Part 1: General.

A NBR 5282 é a principal norma que rege as especificações dos capacitores de potência utilizados no sistema elétrico brasileiro. A seguir, são descritos os principais critérios de especificação utilizados nesta norma:

- a) **Níveis de tensão:** o Quadro 1 especifica os níveis de tensões para regime de longa duração;

Quadro 1: Tensões de regime permanente de longa duração para bancos de capacitores.

Tipo	Tensão (valor eficaz)	Duração máxima	Observações
Frequência nominal	$1,00.V_n$	Contínua	V_n é escolhido como o valor médio mais elevado durante um período qualquer de energização do capacitor, considerando-se o aumento da tensão provocada pela ligação do banco e o perfil de tensão no local da instalação (ver NBR 10671)
Frequência nominal	$1,10.V_n$	12 h para período de 24h	
Frequência nominal	$1,15.V_n$	30 min para período de 24h	
Frequência nominal	$1,20.V_n$	5 min	ver nota 3
Frequência nominal	$1,30.V_n$	1 min	ver nota 3
Frequência nominal mais harmônicos	Valor tal que a corrente não exceda o valor indicado em 5.3 (ver também NBR 10671)		
NOTAS			
<p>1 Para valores de tensão compreendidos entre $1,00.V_n$ e $1,10.V_n$, a duração da sobretensão devida, por exemplo, à queima de unidades, deve ser limitada ao tempo necessário para a reposição das condições normais de funcionamento, conforme nota 2.</p> <p>2 A amplitude da sobretensão que pode ser tolerada sem significativa deterioração do capacitor depende da sua duração, do número total de sobretensões e da temperatura do capacitor.</p> <p>3 As sobretensões indicadas nesta tabela foram assumidas considerando que valores superiores a $1,15.V_n$ não ocorrem mais do que 200 vezes durante a vida do capacitor.</p> <p>4 Os capacitores projetados conforme esta Norma podem operar até 12 h por período de 24 h com até 110% da tensão nominal, desde que a tensão de crista, incluindo todos os harmônicos, não exceda $1,2\sqrt{2}$ vezes a tensão nominal, e a potência máxima não exceda 144% da potência nominal.</p>			

Fonte: Adaptado pelo autor de Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5282, p.8).

- b) **Altitude:** Os capacitores devem ser projetados para operar em altitudes de até 1000 m;
- c) **Buchas:** Devem ser fabricadas de material isolante resistente às intempéries, soldadas diretamente ao tanque e posicionadas simetricamente na superfície da caixa. Ainda, devem estar de acordo com a norma ABNT NBR 5034 (Buchas para Tensão Alternada Superior a 1000 V – Especificação);
- d) **Temperatura:** Os capacitores são classificados em categorias de temperatura, sendo esta especificada por um número seguido por uma letra. O número representa a menor temperatura ambiente na qual o capacitor pode operar e a letra representa o limite superior das faixas de variação de temperatura, conforme indicado no Quadro 2:

Quadro 2: Limites superiores das faixas de variação de temperatura para bancos de capacitores.

Letra	Temperatura do ar ambiente °C		
	Máxima	Média máxima sobre um período de:	
		24 h	1 ano
A	40	30	20
B	45	35	25
C	50	40	30
D	55	45	35

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5282, p. 3).

- e) **Corrente Máxima Permissível:** Os elementos capacitivos devem ser capazes de suportar continuamente (observadas às condições de tensão em regime permanente de longa duração) uma corrente de valor eficaz igual a 1,31 vezes a corrente nominal (I_n), excluindo os transitórios. Em função do valor real da capacitância (a qual pode ser no máximo 1,10 vezes a capacitância nominal), a máxima corrente permissível pode alcançar o valor de $1,44 \cdot I_n$. Estes fatores de sobrecorrente levam em conta os efeitos combinados dos harmônicos e das sobretensões (até 1,10 vezes a tensão nominal).

2.2.1 Ensaios

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 5282, 1998), deverão ser feitos os seguintes ensaios construtivos para os capacitores:

a) Ensaios de Rotina:

- Medição de capacitância (a 20°C);
- Medição do fator de perdas (a 20°C);
- Ensaios de tensão suportável nominal (em Unidades Capacitivas: entre terminais e entre terminais e caixas; e em Bancos de Capacitores);

- Ensaio de estanqueidade (vazamento);
- Ensaio da resistência ôhmica do dispositivo interno de descarga.

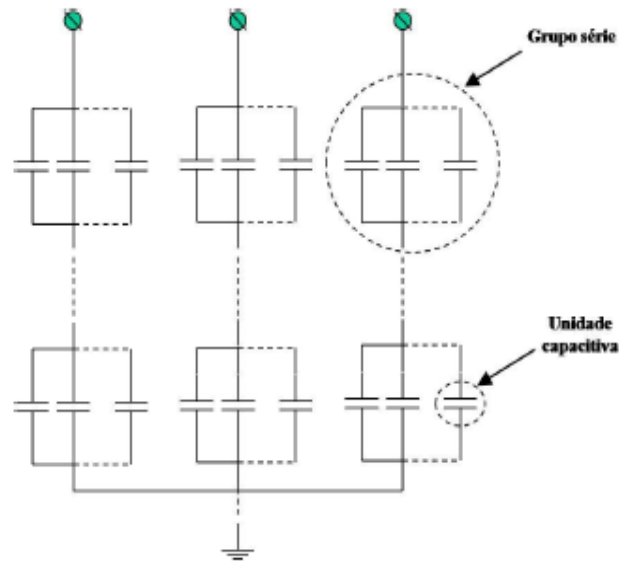
b) Ensaio de Tipo:

- Ensaio de estabilidade térmica;
- Ensaio de tensão suportável nominal entre terminais e caixa;
- Ensaio de tensão suportável de impulso atmosférico entre terminais e caixa;
- Ensaio de descarga de curto circuito;
- Ensaio de tensão residual;
- Medição do fator de perdas à temperatura elevada;
- Ensaio de ionização;
- Ensaio de rádio ruído;
- Ensaio de regeneração (para capacitores auto regenerativos);
- Ensaio de rigidez dielétrica.

2.3 ASPECTOS CONSTRUTIVOS

Os bancos de capacitores são construídos através de conjuntos de unidades capacitivas, também conhecidas como latas ou células capacitivas. Estas unidades são conectadas em série-paralelo de modo a se obter uma determinada quantidade de potência reativa sob um valor especificado de tensão de operação. Conforme representando na Figura 4, são utilizados grupos séries destes conjuntos com o intuito de reduzir a tensão nos terminais de cada célula, adequando-as aos valores nominais de tensão. Além disso, em cada um destes grupos, existem unidades associadas em paralelo com o objetivo de determinar a potência reativa que será fornecida ao sistema (DOS SANTOS, 2010).

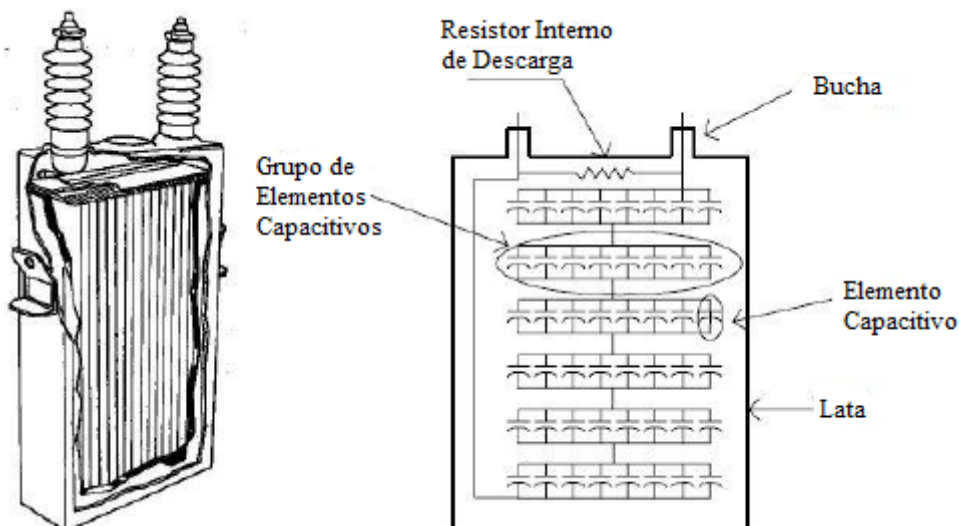
Figura 4: Diagrama de um banco de capacitores.



Fonte: DOS SANTOS (2010, p. 23).

A Figura 5 apresenta um esquemático de uma unidade capacitiva, sendo esta constituída por associação série/paralelo de capacitores individuais. Esses capacitores podem ser compostos por papel ou filme de polipropileno ou alumínio e líquido de impregnação (NATARAJAN, 2005).

Figura 5: Diagrama de uma unidade capacitiva.



Fonte: Adaptado pelo autor de OLIVEIRA & PEREIRA (2010, p. 453).

Segundo D'Ajuz (1985), um ponto de relevante importância na construção de uma unidade capacitiva é a utilização de um resistor interno de descarga (na ordem

de alguns megaohms). Este dispositivo reduz, durante um determinado período de tempo (normalmente, cinco minutos), a tensão nominal do sistema para até 50 V, após o capacitor ter sido desconectado da fonte de tensão.

Além disso, de acordo com o guia IEEE *Std. 18* (2002), um banco econômico (para uma determinada classe de tensão) se deve ao número mínimo de células capacitivas associadas em paralelo (em um mesmo grupo série). Este número é determinado de forma que, ao se isolar uma unidade devido a uma falha, a tensão resultante nas demais não ultrapasse o valor de 110% em relação às tensões nominais de cada célula (D'AJUZ, 1985).

De mesmo modo, segundo a norma NEMA CP-1 (2000), o número máximo de unidades conectadas em paralelo é escolhido de forma que a máxima potência reativa no grupo série seja de 4650 kVAr. Sendo assim, ao se ocorrer uma falha em uma das células capacitivas, esta provoca o surgimento de uma corrente transitória de alta frequência, uma vez que as cargas armazenadas nas demais unidades paralelas são drenadas para esta célula defeituosa. Esta sobrecorrente pode causar a ruptura do invólucro da unidade ou até mesmo uma falta no barramento do banco (DOS SANTOS, 2010). Devido a isto, as células capacitivas devem ser projetadas para suportar essa corrente transitória, cujo módulo será proporcional à quantidade de unidades existentes em paralelo. Uma das formas de se reduzir essa energia armazenada nos capacitores em paralelo é aumentar o número de grupos séries presentes nos bancos.

Ainda, os bancos de capacitores, no que concerne aos aspectos construtivos, diferem quanto à existência e à localização dos fusíveis (interno ou externo) nas células capacitivas que o compõem.

2.3.1 Classificação de Bancos de Capacitores

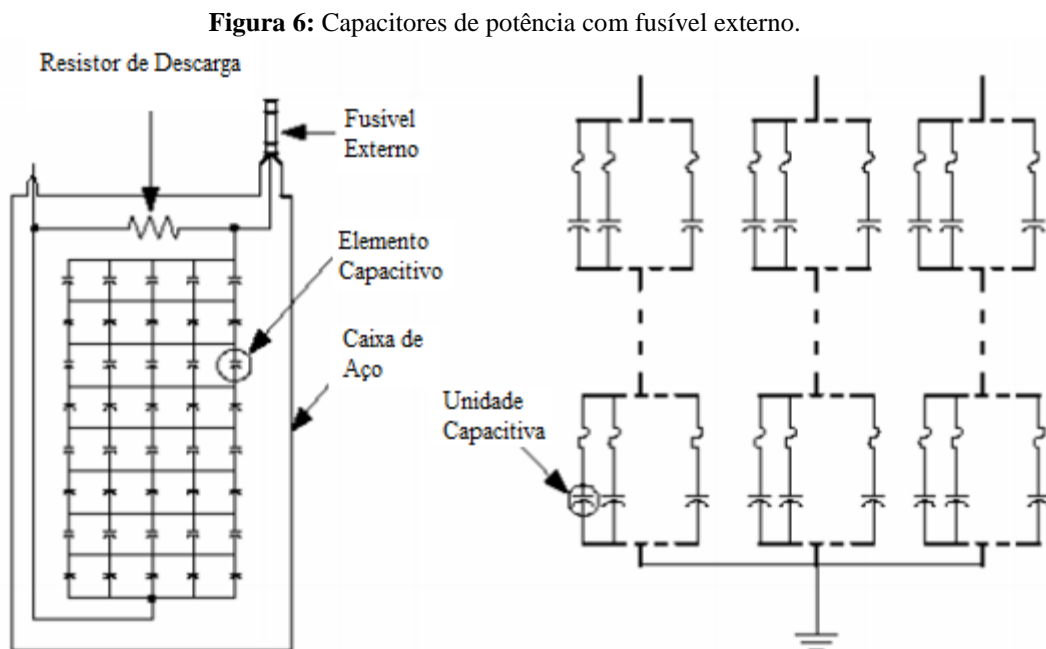
Conforme descrito por Natarajan (2005), os bancos de capacitores podem ser classificados quanto à utilização ou não de fusíveis nas unidades capacitivas, bem como, referente à localização destes na solução. Sendo assim, têm-se três tipos diferentes de bancos:

- Bancos de capacitores com fusível externo,
- Bancos de capacitores com fusível interno,

- Bancos de capacitores sem fusível (*fuseless*).

2.3.1.1 Bancos de Capacitores com Fusível Externo

Segundo Godoi (2009), os bancos que apresentam fusíveis externos são empregados na rede de distribuição de energia elétrica. Eles são constituídos por células capacitivas de altas tensões nominais conectadas em paralelo dentro de um pequeno grupo série. Desta forma, eles permanecem dentro da tolerância do kVAR fornecido no caso de uma falha, sob condições normais de operação. Este tipo de banco de capacitores pode ser observado na Figura 6.



Fonte: Adaptado pelo autor de TZIOUVARAS e DHILLON (1999, p. 4).

A principal vantagem do banco de capacitores com fusível externo é a facilidade visual que se tem da localização do elemento defeituoso, o que torna a troca dessa unidade relativamente simples. Este fusível impede a ruptura do invólucro dessa célula em caso de falha, possibilitando que o banco permaneça em funcionamento, por um determinado tempo, mesmo após a retirada do elemento defeituoso. Com isto, não é necessária a remoção deste banco do sistema. Entretanto, este tipo de banco tem como uma de suas limitações o fato dos fusíveis estarem expostos as intempéries climáticas, ocasionando a necessidade de manutenções

periódicas. Estas manutenções elevam os custos de operação uma vez que o banco precisa ser retirado de funcionamento para que ocorra a troca dos fusíveis danificados. Além disso, nesta tecnologia o tamanho do capacitor é limitado, devendo a corrente nominal do mesmo ser maior ou igual a 60 A (GODOI, 2009).

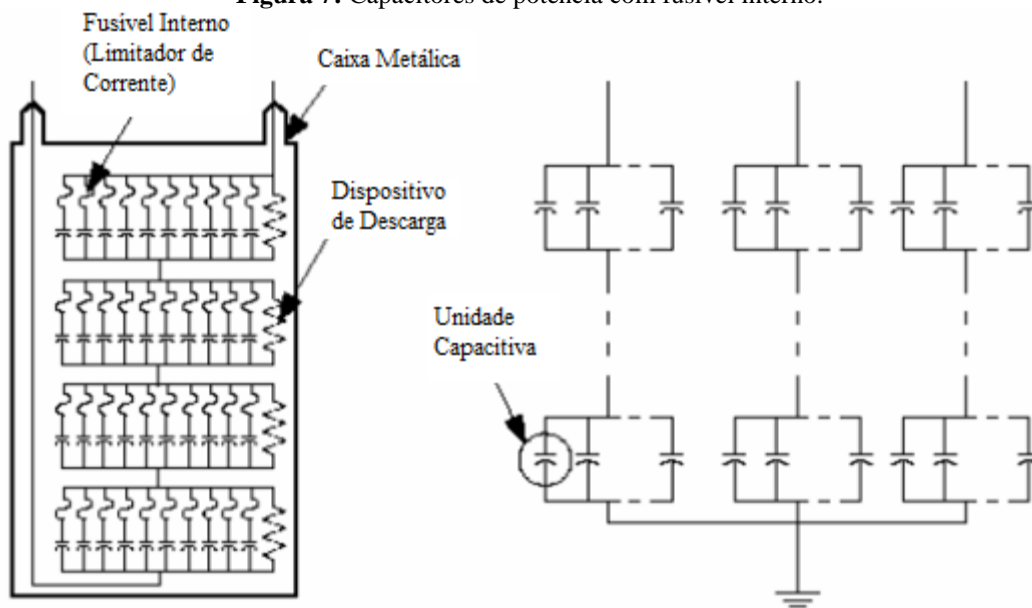
2.3.1.2 Bancos de Capacitores com Fusível Interno

Existe uma forte tendência para a utilização de unidades capacitivas com fusíveis internos (fusíveis limitadores de corrente), em comparação com as unidades com fusível externo. Isto em decorrência de que quando um capacitor individual se danifica, ou seu respectivo fusível interno queima, o banco pode permanecer em funcionamento indefinidamente, uma vez que a célula capacitiva defeituosa é isolada. Segundo D’Ajuz (1985), deve-se ressaltar que alguns elementos da unidade ficarão sujeitos a uma pequena sobrelevação de tensão e, por conseguinte, haverá redução na vida útil destas células.

No projeto de bancos de capacitores com fusível interno são utilizadas menos unidades capacitivas em paralelo, uma vez que a falha de alguns destes elementos não provoca tanto desbalanceamento quanto a retirada de uma lata (caso dos fusíveis externos). Este fato torna esta solução mais econômica e de menor tamanho. Além disso, os bancos com fusível interno possibilitam uma maior facilidade das conexões externas, bem como, a eliminação de barramentos.

Segundo Godoi (2009), a utilização de bancos com fusíveis internos é viável apenas para potências superiores a 300 kVAr e tensões em torno de 8 kV. Ainda, esta solução possui maiores perdas em relação aos bancos com fusíveis externos.

Na Figura 7 está representado um banco de capacitores com fusível interno.

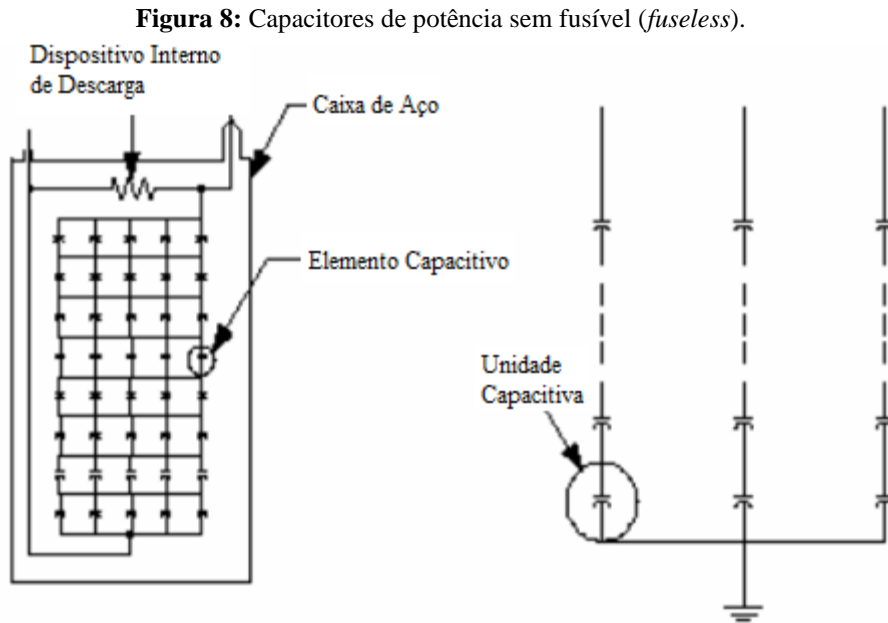
Figura 7: Capacitores de potência com fusível interno.

Fonte: Adaptado pelo autor de TZIOUVARAS e DHILLON (1999, p. 5).

2.3.1.3 Bancos de Capacitores sem Fusível (*Fuseless*)

Segundo Frontin *et al.* (2013), um capacitor sem fusíveis (*fuseless*) apresenta o mesmo processo construtivo interno de um capacitor com fusível externo. Contudo, diferentemente deste último, nos bancos de capacitores sem fusíveis quando uma unidade falha ocorre à fusão das folhas de alumínio. Estas folhas são projetadas para propiciar uma conexão elétrica de baixa resistência e baixa produção de calor, possibilitando que o banco permaneça em operação indefinidamente. Ainda, devido a não existência dos elementos fusíveis, a proteção contra faltas internas, fica a cargo da solda efetiva dos eletrodos. No caso de uma ruptura dielétrica de uma célula capacitiva, esta solda garante a não ocorrência de formação de gases, fazendo com que a unidade permaneça em operação com um grupo série de elementos a menos (NATARAJAN, 2005).

A figura 8 apresenta um diagrama esquemático da estrutura interna dos capacitores sem fusíveis. Nota-se que, devido a esta característica construtiva e à melhora da qualidade dos materiais isolantes utilizados atualmente, o emprego de bancos de capacitores *fuseless* vem aumentando com o passar dos anos (DOS SANTOS, 2010).



Fonte Adaptado pelo autor de TZIOUVARAS e DHILLON (1999, p. 6).

2.4 ESQUEMAS DE LIGAÇÃO

Segundo D'Ajuz (1985), existem quatro tipos de ligação utilizados para bancos de capacitores em derivação, a saber: estrela aterrada ou isolada, dupla estrela aterrada ou isolada, delta e duplo delta. A adoção de uma determinada configuração depende principalmente do aterramento do sistema; além da tensão de operação a qual cada célula estará submetida, da existência ou não dos fusíveis e os esquemas de proteção utilizados. Assim, faz-se necessário avaliar as vantagens e desvantagens de se utilizar determinada configuração.

Em sistemas de potência, dá-se preferência à ligação em estrela, sendo o aterramento do neutro definido por estudos específicos, como por exemplo, a verificação da tensão das fases sãs durante curtos-circuitos monofásicos e a tensão transitória de restabelecimento nos equipamentos de manobra (D'AJUZ, 1985).

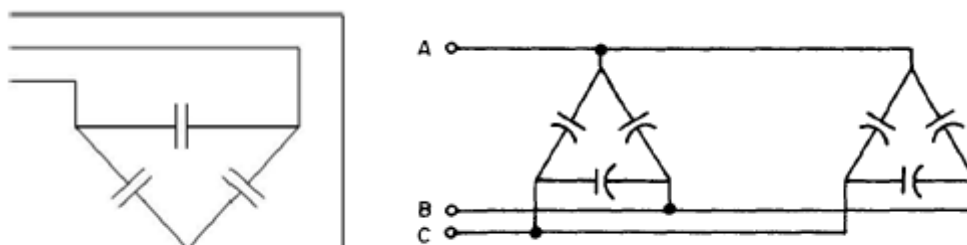
2.4.1 Esquema de Ligação em Delta

Os esquemas de ligação de bancos de capacitores em delta são empregados normalmente na rede de distribuição secundária, para classes de tensão não superiores a 13,8 kV. Isto se deve por razões econômicas no que concerne ao custo de proteção associado a níveis maiores de tensão (FRONTIN *et al.*, 2013). Ainda, as

unidades capacitivas são configuradas com capacitores (dentro de grupos série) dimensionados para tensão fase-fase dessa rede. Com isto, a retirada de uma unidade do arranjo (devido a uma falha) não causa sobretensão nas demais células do grupo (DOS SANTOS, 2010).

Além disso, este esquema impede a circulação de correntes de 3ª harmônica, evitando, assim, interferências eletromagnéticas nos circuitos de comunicação e proteção presentes no sistema. A conexão do banco de capacitores em delta pode ser observada na Figura 9.

Figura 9: Ligação de banco de capacitores em delta e duplo delta



Fonte: Adaptado pelo autor de D'AJUZ (1985, p. 231) e DOS SANTOS (2010, p.30).

2.4.2 Esquema de Ligação em Estrela Aterrada

Segundo D'Ajuz (1985), as vantagens de um banco de capacitores conectado em estrela com neutro aterrado são:

- Este tipo de configuração fornece um caminho de escoamento (para o terra) de baixa impedância para correntes de altas frequências. Deste modo, o banco pode ser utilizado como filtro em sistemas com abundância de harmônicos;
- Uma vez que bancos com este esquema de ligação são auto protegidos contra surtos atmosféricos, não são necessários para-raios adicionais com esta finalidade;
- A tensão transitória de restabelecimento nos dispositivos de manobra (disjuntores, chaves ou fusíveis limitadores) é relativamente baixa devido ao neutro ser fixo o que reduz o risco de reacendimento do arco (*restrike*);

- Baixo custo de instalação, uma vez que não é necessário que o neutro esteja isolado ao nível básico de isolamento (NBI) do sistema.

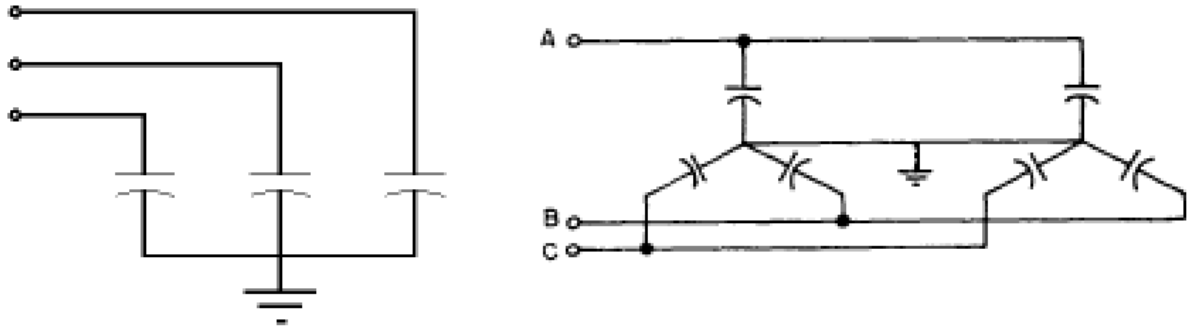
Como desvantagens da ligação estrela aterrada pode-se destacar as seguintes:

- Aumento da interferência eletromagnética em circuitos de comunicação em virtude da circulação de correntes de harmônicas para o terra;
- Possibilidade do surgimento de problemas de atuações indevidas na proteção de sobrecorrentes do banco, devido à circulação de correntes de harmônicas. Além de queima de fusíveis acima do normal e de possíveis danificações nas unidades capacitivas;
- Maiores correntes de energização (*inrush*) circulando pela malha de aterramento da subestação e contendo componentes de alta frequência;
- Obrigatoriedade de instalação de reatores série com o intuito de diminuir o produto do *módulo x frequência* da corrente transitória de descarga dos bancos durante curto-circuito. Ainda existe a necessidade de se instalar limitadores de tensão nos secundários dos transformadores de corrente (TC) de toda a subestação. Isto se deve ao fato que a circulação de correntes com alto valor de amplitude e frequência, ao percorrer as cargas indutivas do TC, provoca o surgimento de tensões prejudiciais ao isolamento do enrolamento secundário e aos equipamentos associados a este (relés de proteção, medidores, etc.).

Ainda, este esquema de ligação é bastante usado em sistemas de transmissão acima de 230 kV. Isto se deve pelo fato de que, nesses níveis de tensões nominais, as sobretensões transitórias de manobra são superiores aos surtos devido a descargas atmosféricas (FRONTIN *et al.*, 2013). Além disso, sabe-se em sistemas não aterrados as sobretensões são mais elevadas do que em sistemas solidamente aterrados. Desta forma, a instalação de bancos conectados em estrela aterrada é, nestes casos, a melhor opção tanto do ponto de vista econômico como de segurança.

A seguir, na Figura 10, são apresentados os esquemas de ligação estrela aterrada e dupla estrela aterrada:

Figura 10: Ligação de banco de capacitores em estrela aterrada e dupla estrela aterrada.



Fonte: Adaptado pelo autor de D'AJUZ (1985, p. 231) e BARROS (2015, p.14).

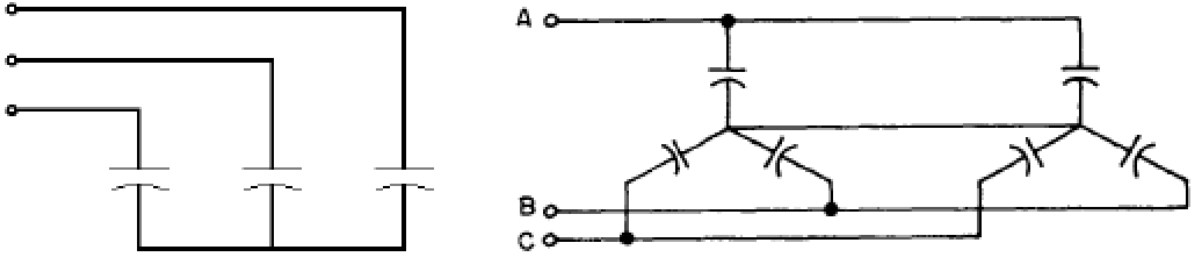
2.4.3 Esquema de Ligação em Estrela com Neutro Isolado

Segundo Frontin *et al.* (2013), o esquema de ligação em estrela isolada é utilizado para sistemas com tensões nominais até 72,5 kV. Além disso, este tipo de conexão não permite a circulação de correntes de sequência zero, correntes de 3^a harmônica e a passagem de grandes correntes de descargas capacitivas durante faltas no sistema para o terra. Assim, bancos com este tipo de ligação são utilizados em sistemas que prezam pela continuidade de funcionamento no caso de ocorrência dessas faltas. Entretanto, nesta configuração, o neutro deve ser isolado para tensões fase-fase, o que acaba encarecendo a instalação de bancos com tensão nominal acima de 15 kV (BARROS, 2015).

Outra vantagem da ligação estrela com neutro isolado é a não ocorrência de interferências nos circuitos de comunicação (devido a não circulação de correntes harmônicas).

Como desvantagens, além do neutro ser isolado para tensões de fase, deve-se adotar uma atenção especial, no que concerne a tensão transitória de reestabelecimento dos equipamentos de manobra. Esta tensão poderá encarecer o disjuntor ou seccionadora responsável pelo banco de capacitores, aumentando o custo da solução. A Figura 11 apresenta as ligações em estrela isolada e dupla estrela isolada.

Figura 11: Ligação de banco de capacitores em estrela isolada e dupla estrela isolada.



Fonte: Adaptado pelo autor de D'AJUZ (1985, p. 231) e BARROS (2015, p.15).

3 TRANSITÓRIOS NO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

Segundo Greenwood (1991), um transitório elétrico é um evento caracterizado por uma mudança repentina nas condições do circuito, como por exemplo, a abertura ou fechamento de uma chave ou a ocorrência de uma falta no sistema. Esse transitório ocorre geralmente por um período extremamente curto, fazendo com que o tempo em que os equipamentos operam durante ele seja insignificante quando comparado ao período de atuação em condições de regime. Apesar disso, o estudo do comportamento do sistema durante este evento é de grande importância, uma vez que, nessas condições, os componentes ficam sujeitos a efeitos indesejados devido a correntes e tensões excessivas. Nota-se que, em casos extremos, estas correntes e tensões podem acarretar em danos aos equipamentos, além de afetar a qualidade de fornecimento de energia do sistema.

Nas seções subsequentes serão analisados os efeitos dos transitórios ocasionados pelo chaveamento de bancos de capacitores em derivação e como eles afetam o sistema elétrico e os demais equipamentos que o compõem.

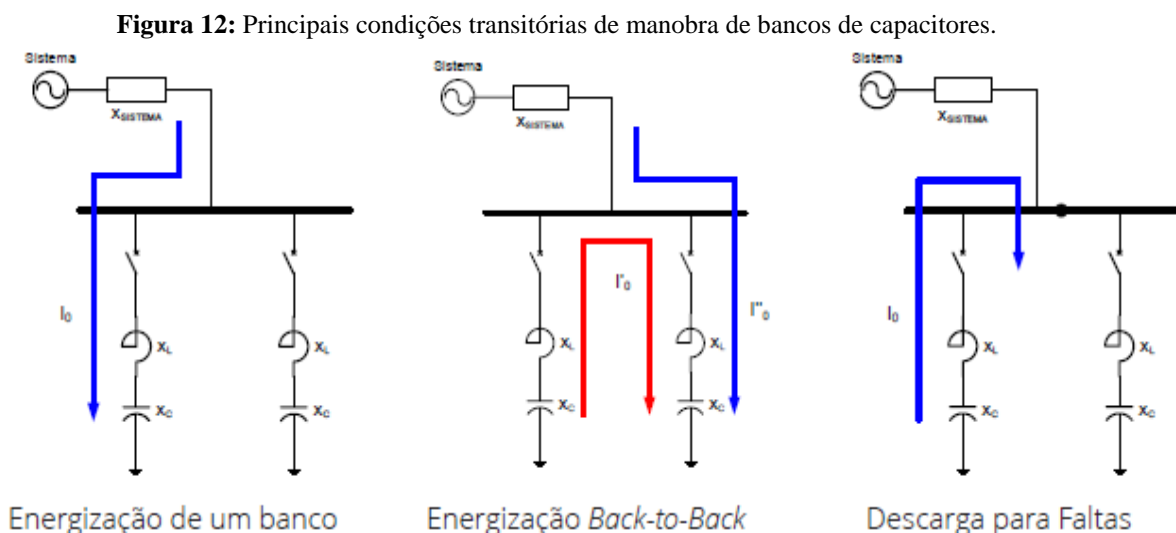
3.1 TRANSITÓRIOS DEVIDO AO CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES

O evento transitório mais frequente em sistemas de potência se deve a alterações ocasionadas em operações de chaveamento (GREENWOOD, 1991). Particularmente, a energização e desenergização de bancos de capacitores *shunt* são operações que podem ocasionar transitórios significativos. Estes ocorrem devido as correntes de *inrush* e reacendimentos de arco (reestabelecimento da corrente entre os contatos do disjuntor, durante uma operação de interrupção). Nota-se que a energização de um banco implica efeitos locais na subestação (ou barramento, no qual está conectado), além de causar efeitos remotos nas extremidades das linhas de transmissão ligadas a esta, como por exemplo, o surgimento de sobretensões no sistema (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Os transitórios devidos ao chaveamento de bancos de capacitores podem ser originados, segundo Das (2010) e Frontin *et al.* (2013), por:

- Energização isolada de um banco em derivação, durante um evento de falta;
- Energização de um banco de capacitores em contraposição (*back-to-back*). Ou seja, quando, com a presença de um banco já energizado (em operação), se chaveia um segundo banco (ou mais) no mesmo barramento;
- Desenergização de um banco durante condições normais de operação ou devido às faltas próximas o local de instalação;
- Ocorrência de reignição do arco (*restrike*) dos equipamentos de manobra durante a abertura de um banco de capacitores;
- Possibilidade de surgimento de frequência de ressonância secundária quando os capacitores estão sendo utilizados em sistemas de distribuição com multi-níveis de tensão;
- Fechamento do banco quando o mesmo está energizado (pré-carregado).

A Figura 12 apresenta os principais eventos transitórios associados aos bancos de capacitores em derivação.



Fonte: FRONTIN *et al.* (2013, p. 662).

Conforme descrito por Frontin *et al.* (2013), existem duas condições de manobra de bancos de capacitores possíveis: manobra de banco único e manobra de

banco de capacitores em contraposição (*back-to-back*). O chaveamento de um banco único de capacitores acarreta elevadas sobretensões locais e remotas, enquanto que o chaveamento de bancos em contraposição ocasiona correntes de *inrush* de grandes magnitudes no sistema.

Sabe-se que durante a energização de um banco, os capacitores se comportam como um curto-circuito para o sistema. Isto faz com que, após o fechamento do disjuntor, sejam geradas tensões e correntes transitórias de elevada magnitude e frequência de oscilação. Estas tensões e correntes podem impor severos danos ao próprio banco de capacitores, bem como aos demais equipamentos da subestação.

Ainda, durante a energização, os valores atingidos nestes transitórios eletromagnéticos, bem como a sua duração, dependem do instante em que o banco é chaveado (em relação à onda de tensão). Além disso, eles dependem também das capacitâncias e indutâncias existentes nos circuitos envolvidos, da carga inicial dos capacitores no instante da energização e dos amortecimentos produzidos pelas resistências dos circuitos.

Considerando as duas possibilidades de manobras mencionadas anteriormente, tem-se que a energização isolada de um banco é a condição menos severa, uma vez que a impedância do sistema atua como fator limitante para correntes transitórias (FRONTIN *et al.*, 2013). Ainda, neste caso, a frequência de oscilação é inferior a 1000 Hz, o que propicia, através de transformadores, a transferência de surtos de tensão para redes com menores níveis de tensão. Nota-se também, que as tensões transitórias (resultantes dessa condição de manobra), podem alcançar valores de pico fase-terra na ordem de 2,0 pu (GREENWOOD, 1991).

Por outro lado, tanto a desenergização de bancos de capacitores como a energização de bancos em contraposição originam correntes transitórias bem superiores em comparação com a energização de um banco único. Nestes casos, o valor de pico da corrente pode vir a ser dezenas de vezes maior que a própria corrente nominal do banco. Por consequência disto, podem ocorrer operações indevidas dos relés de proteção, queima de fusíveis limitadores, sobretensões nos transformadores de corrente (de linha e/ou de neutro) e falhas internas no próprio banco, conforme descrito por Frontin *et al.* (2013). Do mesmo modo, a frequência de oscilação pode alcançar valores de até 20 kHz (MELIOPOULOS, 1988).

No que concerne as sobretensões originadas pelas manobras de desenergização de bancos de capacitores, essas ocorrem devido ao fenômeno de

reignição na abertura dos contatos do disjuntor. Neste caso, surge uma tensão de restabelecimento transitória (TRT) entre os contatos do dispositivo de manobra, com frequência e amplitude elevadas (PAMPLONA *et al.*, 1998). Ainda, estas sobretensões podem alcançar valores na ordem de 4,0 pu.

Além disso, segunda Das (2010), a aplicação de bancos de capacitores em derivação (*shunt*) pode ocasionar também os seguintes efeitos adicionais no sistema:

- Distorções harmônicas das ondas de corrente e tensão e ressonâncias severas em conjunto com as cargas geradoras de harmônicas;
- Aumento das correntes de energização (*inrush*) transitórias em transformadores, além de gerar sobretensões e o prolongamento da taxa de decaimento;
- Estresse na parte construtiva dos próprios capacitores devido aos transitórios gerados pelo chaveamento;
- Aumento do número de atuações por parte dos equipamentos de manobra, o qual pode ser superior aos valores especificados nas normas técnicas;
- Descarga do banco de capacitores em condições de falta, provocando sobretensões que podem danificar os terminais secundários dos transformadores de corrente;
- Impactar a qualidade de energia fornecida às cargas sensíveis presentes no sistema, como por exemplo, os sistemas de *drives* (inversores), podendo causar o desligamento das mesmas.

No que concerne as correntes de energização (*inrush*) produzidas durante o chaveamento de bancos de capacitores, pode-se fazer as seguintes observações (D'AJUZ, 1985):

- Na existência de um banco único de capacitores conectado a uma barra, a corrente de *inrush* do mesmo será menor do que a corrente de curto-circuito no ponto de instalação deste;
- Quando houver o chaveamento de bancos em contraposição (chaveamento *back-to-back*), as correntes de energização tendem a ser

mais elevadas. Isto ocorre, uma vez que a contribuição do banco (originalmente conectado à barra) é limitada pela indutância do barramento apenas;

- Quando um banco de capacitores é chaveado em *back-to-back* a corrente de *inrush* poderá exceder a corrente de curto-circuito no ponto onde o banco está instalado;
- A forma de onda produzida durante o chaveamento de um banco de capacitores é não senoidal fazendo com que ocorra o surgimento de uma onda de alta frequência em sobreposição à onda de tensão senoidal (60 Hz).

3.2 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DOS TRANSITÓRIOS DEVIDOS AO CHAVEAMENTO DE BANCOS DE CAPACITORES

Conforme descrito anteriormente, um transitório eletromagnético ocorre toda vez que as condições iniciais de um circuito são alteradas. Além disso, este evento se torna mais frequente à medida que operações de chaveamentos ocorrem no sistema (GREENWOOD, 1991).

Segundo Meliopoulos (1988), um dos principais desafios na análise de transitórios em sistemas de potência é a escolha de modelos que consigam representar fisicamente o sistema real. Estes modelos matemáticos devem representar da forma mais precisa os fenômenos físicos a ser estudados. Em contrapartida, para que essa análise seja prática, estes modelos devem ser o mais simples possível.

No presente trabalho, com o intuito de estudar os transitórios devidos aos chaveamentos de bancos de capacitores, se analisará matematicamente o comportamento das principais configurações de circuitos existentes no sistema elétrico de potência (circuitos RL, RLC e LC). Ainda, serão considerados inicialmente apenas modelos matemáticos de circuito monofásicos, devido a sua menor complexidade. Após, estudar-se-á o comportamento dos transitórios em sistemas trifásicos.

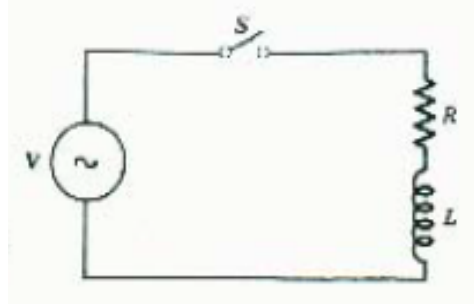
Em um segundo momento, serão analisados os principais métodos de mitigação das sobretensões e sobrecorrentes ocasionadas a partir de manobras dos bancos. Além disso, comentar-se-á sobre a influência dos transitórios na

especificação dos demais equipamentos do sistema elétrico decorrentes da instalação de bancos de capacitores.

3.2.1 Análise de Transitórios em Circuitos RL

Admitindo um circuito RL, alimentado por uma fonte de tensão senoidal, como o representado na Figura 13. Este tipo de circuito pode ser considerado como um modelo simplificado para um circuito com disjuntor, sendo o fechamento da chave S equivalente à ocorrência de uma falha no sistema.

Figura 13: Diagrama de um circuito RL.



Fonte: GREENWOOD (1991, p. 38).

Assume-se que a impedância da fonte possa ser desconsiderada quando comparada com a da carga. No momento em que a chave S for fechada, a corrente é dada (através das Leis de *Kirchhoff*) pela equação:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (1)$$

Segundo Greenwood (1991), a fase θ permite o fechamento da chave S em qualquer instante de tempo. Ainda, a Equação (1) pode ser reescrita, após uma expansão de soma de senos, como:

$$V_m [\text{sen}(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t) \text{sen}(\theta)] = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

Utilizando a Transformada de Laplace em ambos os lados da Equação (2) tem-se:

$$V_m \left[\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos(\theta) + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \text{sen}(\theta) \right] = RI(s) + L[sI(s) - i(0)] \quad (3)$$

Lembrando que $\text{sen}(\theta)$ e $\cos(\theta)$ serão constantes apenas quando for atribuído algum valor a fase θ . Uma vez que a chave S estava inicialmente aberta, no momento de seu fechamento $i(0) = 0$, assim a corrente será dada por:

$$I(s) = \frac{V_m}{L(s + R/L)} \left[\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos(\theta) + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \text{sen}(\theta) \right] \quad (4)$$

Pode-se utilizar o método de frações parciais e a Transformada Inversa de Laplace na equação (4) para se obter uma expressão para a corrente no domínio do tempo. Ainda, empregando a constante de tempo do circuito RL, $\alpha = R/L$, simplifica-se a equação de forma que:

$$i(t) = \frac{V_m}{L(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ \omega \cos(\theta) \left[e^{-\alpha t} - \cos(\omega t) + \frac{\alpha}{\omega} \text{sen}(\theta) \right] + \text{sen}(\theta) [\alpha \cos(\omega t) + \omega \text{sen}(\omega t) - \alpha e^{-\alpha t}] \right\} \quad (5)$$

$$i(t) = \frac{V_m}{L(\alpha^2 + \omega^2)} \left\{ [\omega \cos(\theta) - \alpha \text{sen}(\theta)] e^{-\alpha t} + [\omega \cos(\theta) - \alpha \text{sen}(\theta)] \cos(\omega t) + [\alpha \cos(\theta) + \omega \text{sen}(\theta)] \text{sen}(\omega t) \right\} \quad (6)$$

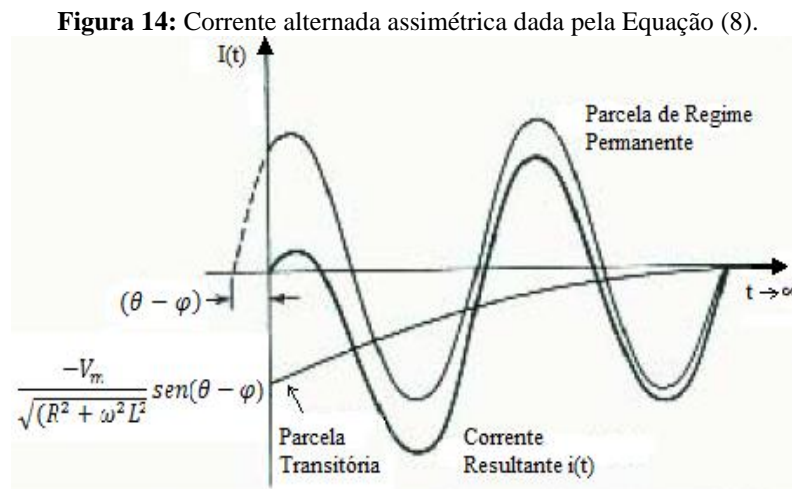
Sabe-se que o fator de potência, em regime permanente, do circuito da Figura 13 é:

$$\cos \varphi = \frac{R}{|Z|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} \quad (7)$$

A partir da Equação (7), tem-se que a $\text{tg } \varphi = (\omega L)/R$ e assim: $\text{sen } \varphi = \omega / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}$ e $\text{cos } \varphi = \alpha / \sqrt{\alpha^2 + \omega^2}$. Por conseguinte, a Equação (6) pode ser reescrita como:

$$i(t) = \frac{V_m}{\sqrt{(R^2 + \omega^2 L^2)}} \left[\text{sen}(\omega t + \theta - \varphi) - \text{sen}(\theta - \varphi) e^{-\frac{R}{L}t} \right] \quad (8)$$

A Figura 14 apresenta a resposta do circuito RL no domínio do tempo. Esta resposta é composta de duas parcelas, sendo a primeira correspondente ao valor da corrente em regime permanente e a segunda referente ao transitório.



Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 40).

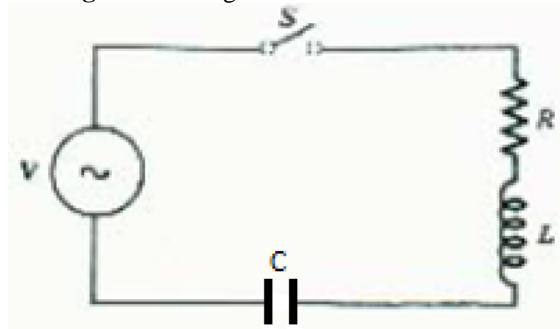
É possível notar que a parcela de regime permanente possui uma amplitude $V_m/|Z|$ e um ângulo de fase φ em relação à tensão. O termo transitório da Equação (8) envolve a exponencial $e^{-\frac{R}{L}t}$, cujo valor é oposto (porém igual em módulo) ao termo de regime permanente no instante $t = 0$. Desta forma, assegura-se que a corrente inicie a partir do zero (GREENWOOD, 1991).

Além disso, analisando-se a Figura 14, pode-se perceber que caso a chave S seja fechada no instante em que $\theta = \varphi$, a parcela transitória será nula e a onda da corrente será simétrica. Por outro lado, caso a chave S seja fechada quando $\theta - \varphi = \mp \pi/2$, o termo transitório terá amplitude máxima e o primeiro pico da corrente resultante será o dobro do pico de amplitude da componente senoidal de regime permanente. Estes dois casos acarretam em implicações práticas significantes para o uso de disjuntores em sistemas de potência.

3.2.2 Análise de Transitórios em Circuitos RLC

Seja um circuito RLC, alimentado por uma fonte de tensão senoidal, conforme representado na Figura 15. Este circuito pode ser considerado como um modelo para um sistema de distribuição com bancos de capacitores instalados.

Figura 15: Diagrama de um circuito RLC.



Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 38).

Novamente, considera-se que a impedância da fonte possa ser desconsiderada quando comparada com a da carga. Assim, no momento em que a chave S for fechada, a corrente pode ser obtida (através das Leis de *Kirchhoff*) pela equação:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) \cdot dt \quad (9)$$

Equação (9) pode ser reescrita, após uma expansão de soma de senos, como:

$$V_m [\text{sen}(\omega t) \cos(\theta) + \cos(\omega t) \text{sen}(\theta)] = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) \cdot dt \quad (10)$$

Utilizando a Transformada de Laplace em ambos os lados da Equação (10) tem-se:

$$V_m \left[\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos(\theta) + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \text{sen}(\theta) \right] = RI(s) + L[sI(s) - i(0)] + \frac{I(s)}{sC} \quad (11)$$

Supondo que a chave S estava inicialmente aberta, no momento de seu fechamento $i(0) = 0$, e com isto a corrente será dada por:

$$I(s) = \frac{V_m}{R + sL + \frac{1}{sC}} \left[\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos(\theta) + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \text{sen}(\theta) \right] \quad (12)$$

Simplificando-se a equação (12), tem-se:

$$I(s) = \frac{V_m}{s^2 + s\frac{R}{L} + \frac{1}{LC}} \left[\frac{\omega}{s^2 + \omega^2} \cos(\theta) + \frac{s}{s^2 + \omega^2} \text{sen}(\theta) \right] \quad (13)$$

Utilizando o *software* matemático *MATLAB*[®] 2015 (*MATrix LABoratory*) para se obter a Transformada Inversa de Laplace da equação (13) tem-se:

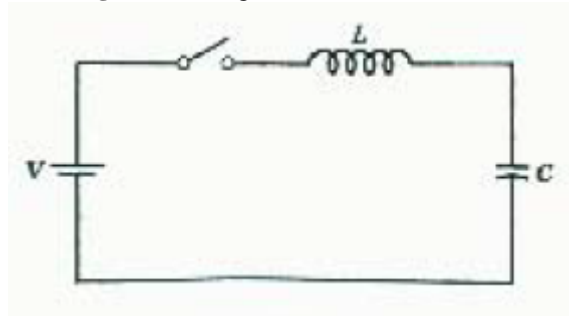
$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{1}{\sqrt{\frac{CR^2}{4} - L}} \left(C^2 L V_m \omega \left(CL\omega^2 \text{sen } \omega t \text{sen } \theta - CL\omega^2 \cos \omega t \cos \theta \right. \right. \\ &+ \left. \cos \omega t \cos \theta - \text{sen } \omega t \text{sen } \theta + CR\omega \cos \omega t \text{sen } \theta \right. \\ &+ \left. \frac{CR\omega \cos \theta \text{sen } \omega t}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R^2 \omega^2 - 2CL\omega^2 + 1} \right) \\ &- e^{-\frac{Rt}{2L}} \left(\cosh t \left(\frac{\sqrt{\frac{CR^2}{4} - L}}{L\sqrt{C}} \right) - \sqrt{C}L \sinh t \left(\frac{\sqrt{\frac{CR^2}{4} - L}}{L\sqrt{C}} \right) \right) \left(\frac{R}{2L} \right. \\ &\left. - \frac{(V_m \text{sen } \theta C^3 L^2 \omega^2 + R V_m \cos \theta C^3 L \omega - V_m \text{sen } \theta C^2 L)}{(-V_m \cos \theta C^4 L^3 \omega^3 + R V_m \text{sen } \theta C^4 L^2 \omega^2 + V_m \cos \theta C^3 L^2 \omega)} \right) \quad (14) \end{aligned}$$

3.2.3 Análise de Transitórios em Circuitos LC

Ao se observar a equação (14), resultante da análise do circuito RLC (Figura 15), percebe-se uma grande complexidade envolvendo o comportamento transitório deste sistema. É possível simplificar esta análise, uma vez que a resistência da linha de transmissão é, em geral, muito menor do que a indutância desta ($R \ll L$). Sendo

assim, o transitório produzido pela presença do banco de capacitores *shunt* pode ser estudado através do comportamento de um circuito LC.

Figura 16: Diagrama de um circuito LC.



Fonte: GREENWOOD (1991, p. 22).

Observando-se o circuito da Figura 16, percebe-se que neste caso existem duas fontes de armazenamento de energia no sistema, ocasionando uma solução composta por uma equação diferencial de segunda ordem. Quando a chave S for fechada, através das Leis de *Kirchhoff*, obtém-se o seguinte equacionamento:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \theta) = L \frac{di(t)}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = LC \frac{d^2 V_c(t)}{dt^2} + V_c(t) \quad (15)$$

A análise do circuito LC da equação (15) pode ser feita tanto em função da corrente (primeira parte da igualdade presente no lado esquerdo) como em função da tensão. No caso da tensão, a corrente $i(t)$ é substituída por $C \frac{dV_c(t)}{dt}$.

Para simplificar ainda mais a análise, considera-se o pior caso para o cálculo da corrente de energização do banco de capacitores (chave S sendo fechada quando a tensão $v(t)$ está no seu valor máximo). Com isto, é possível admitir que a tensão seja constante durante o transitório. Isto ocorre uma vez que a frequência durante o evento transitório (de 200 Hz até 600 Hz) é muito maior do que a frequência do sistema de potência (MELIPOULOS, 1988).

Assim, pode-se encontrar a corrente $i(t)$ substituindo, na primeira parte do lado esquerdo da equação (15), $\frac{1}{C} \int_0^t i(t) dt = \frac{Q_c}{C}$ e aplicando a Transformada de Laplace. Com isto, tem-se:

$$L[sI(s) - i(0)] + \frac{I(s)}{sC} + \frac{Q_c(0)}{sC} = \frac{V}{s} \quad (16)$$

Onde $Q_c(0)$ representa a carga inicial no capacitor. Além disso, como $V_c(t) = \frac{Q_c(t)}{C}$, obtém-se:

$$V = s^2LI(s) - sLi(0) + \frac{I(s)}{C} + v_c(0) \quad (17)$$

Supondo que no momento em que a chave S é fechada $i(0) = 0$, a corrente pode ser expressa por:

$$I(s) = \frac{V - v_c(0)}{s^2L + \frac{1}{C}} \quad (18)$$

É possível reescrever a equação (18) na forma:

$$I(s) = [V - v_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\frac{\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \right) \quad (19)$$

Onde $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ é a frequência natural do circuito LC. Ainda, observando-se a equação (19) pode-se notar que a impedância característica do sistema é dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace na equação (19) tem-se que a corrente de energização do capacitor será:

$$i(t) = [V - v_c(0)] \sqrt{\frac{C}{L}} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (20)$$

Para se calcular a tensão no capacitor utiliza-se a segunda parte (lado esquerdo da igualdade) da equação (15). Esta pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\frac{d^2V_c(t)}{dt^2} + \omega_0^2V_c(t) = \omega_0^2V \quad (21)$$

Aplicando-se a Transformada de Laplace em (21) tem-se:

$$s^2V_c(s) - sV_c(0) - V_c'(0) + \omega_0^2V_c(s) = \omega_0^2\frac{V}{s} \quad (22)$$

Uma vez que $i(0) = 0$, então $V_c'(0) = 0$. Logo:

$$V_c(s) = \frac{1}{s} \left(\frac{\omega_0^2V}{s^2 + \omega_0^2} \right) + \frac{sV_c(0)}{s^2 + \omega_0^2} \quad (23)$$

Utilizando o método de frações parciais pode-se reescrever a equação (23) como:

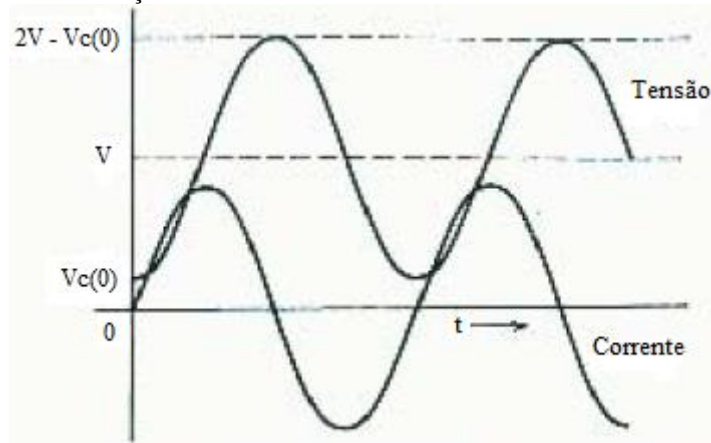
$$V_c(s) = V \left(\frac{1}{s} - \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \right) + V_c(0) \frac{s}{s^2 + \omega_0^2} \quad (24)$$

Aplicando a Transformada Inversa de Laplace obtém-se:

$$\begin{aligned} V_c(t) &= V[1 - \cos(\omega_0 t)] + V_c(0)\cos(\omega_0 t) \\ V_c(t) &= V - [V - V_c(0)]\cos(\omega_0 t) \end{aligned} \quad (25)$$

Na Figura 17 está representada a relação existente entre a tensão e a corrente no circuito LC.

Figura 17: Relação existente entre a tensão e a corrente em um circuito LC.



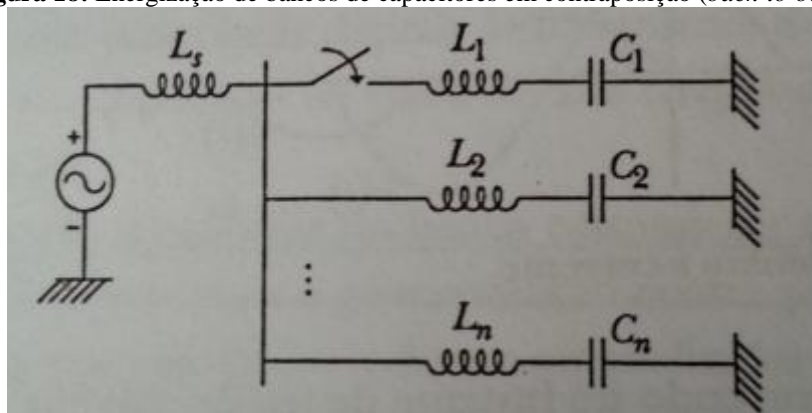
Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 26).

3.2.4 Análise de Transitórios de Bancos de Capacitores em *Back-to-Back*

O chaveamento *back-to-back* envolve a energização de um banco de capacitores quando já se tem um ou mais bancos energizados no mesmo barramento (DAS, 2010). Além disso, sabe-se que a diferença de potencial entre os bancos é eliminada pela redistribuição de cargas. Desta forma, os bancos em operação se descarregam para que ocorra a energização do outro banco, provocando excessivas correntes de energização (*inrush*), conforme descrito por Pamplona *et al.* (1998).

O circuito da Figura 18 representa o fenômeno de energização do n -ésimo banco em um barramento com $n - 1$ bancos de capacitores energizados.

Figura 18: Energização de bancos de capacitores em contraposição (*back-to-back*).



Fonte: ZANETTA JÚNIOR (2003, p. 496).

O sistema equivalente da fonte de alimentação pode ser representado pela indutância L_S . Esta é uma aproximação razoável, supondo a existência de transformadores para a conexão do banco de capacitores às linhas de transmissão (ZANETTA JÚNIOR, 2003). Além disso, sejam L_i , onde $i = 1, 2, \dots, n$, as indutâncias de barramento e de possíveis conexões dos bancos à subestação.

Considera-se também que as frequências, no circuito, são altas e que $L_S \gg L_i$, uma vez que as indutâncias de barramento são bem inferiores neste caso. Ainda, segundo Das (2010) e Zanetta Júnior (2003), as correntes irão fluir apenas entre as indutâncias L_i , podendo-se desprezar a contribuição de corrente do restante do sistema. Com isto, tem-se um circuito composto apenas pelos bancos de capacitores, sendo que os bancos já em operação possuem uma carga armazenada e o banco a ser energizado encontra-se descarregado.

Analisando para o caso monofásico e supondo que os bancos de capacitores sejam iguais, tem-se:

$$L = L_1 = L_2 = \dots = L_n \quad (26)$$

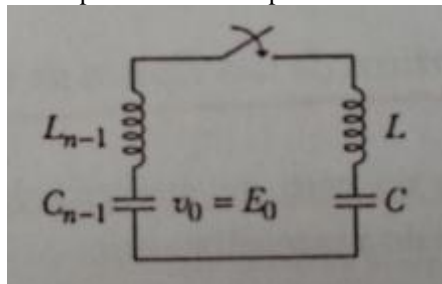
$$C = C_1 = C_2 = \dots = C_n \quad (27)$$

Assim, obtém-se o circuito equivalente mostrado na Figura 19, onde para os bancos energizados considera-se:

$$L_{n-1} = \frac{L}{n-1} \quad (28)$$

$$C_{n-1} = C(n-1) \quad (29)$$

Figura 19: Circuito equivalente para bancos de capacitores em contraposição (*back-to-back*).



Fonte: ZANETTA JÚNIOR (2003, p. 497).

Considerando o caso crítico em que a energização do banco ocorre no instante em que a tensão na barra está em seu valor máximo E_0 e supondo que a tensão armazenada no banco $v_0 \approx E_0$, obtém-se:

$$L_{eq} = L + L_{n-1} = L \left(\frac{n}{n-1} \right) \quad (30)$$

$$C_{eq} = \frac{C \cdot C_{n-1}}{C + C_{n-1}} = C \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (31)$$

Desta forma, a corrente máxima pode ser obtida por:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{E_0}{\sqrt{\frac{L_{eq}}{C_{eq}}}} = \left(\frac{n-1}{n} \right) \frac{E_0}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (32)$$

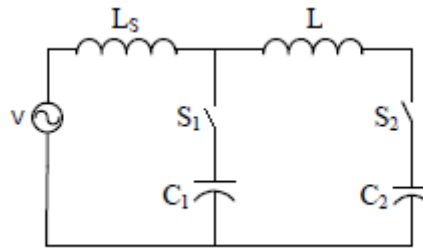
Observa-se que a frequência natural do circuito coincide com a frequência natural do banco de capacitores, sendo dada por:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (33)$$

Nesta análise, percebe-se que as manobras de bancos de capacitores em contraposição não provocam grandes variações de tensão na subestação, uma vez que a troca maior de energia acontece apenas entre os bancos. Deste modo, a circulação de corrente através das indutâncias relativamente pequenas dos barramentos não introduz sobretensões elevadas no sistema (ZANETTA JÚNIOR, 2003).

Investiga-se agora o comportamento de um sistema com apenas dois bancos de capacitores conectados no barramento, estando um deles já energizado e um segundo em processo de energização. A Figura 20 mostra o circuito considerado. Sabe-se que, neste caso, após a chave ser fechada, ocorrem dois eventos transitórios no circuito (GREENWOOD, 1991).

Figura 20: Circuito com dois capacitores conectados em contraposição (*back-to-back*).

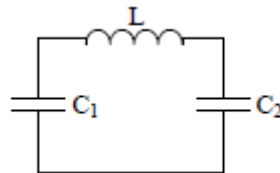


Fonte: Adaptado pelo autor de SUWANASRI *et al.* (2009, p. 2).

Para o primeiro evento transitório, considera-se a chave S_1 inicialmente fechada (capacitor C_1 energizado). Ao se fechar a chave S_2 , a carga armazenada em C_1 é descarregada no sentido de energizar C_2 , fazendo com que essa carga se divida entre ambos os bancos. Uma vez que isto ocorre num instante de tempo extremamente curto, pode-se desprezar a corrente da fonte de alimentação.

Na Figura 21 é representado o circuito equivalente ao primeiro evento transitório.

Figura 21: Circuito equivalente ao primeiro evento transitório.



Fonte: Adaptado pelo autor de SUWANASRI *et al.* (2009, p. 1).

Considera-se o pior caso, no qual o banco C_1 está carregado com a tensão de pico (V_p) do sistema e o banco C_2 está completamente descarregado. A corrente de energização (*inrush*) entre os capacitores C_1 e C_2 é dada por:

$$I_{inrush} = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{L}{C_{eq}}}} = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{L}{\left(\frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}\right)}}} \quad (34)$$

A frequência resultante da corrente de energização e da sobretensão transitória pode ser obtida por:

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{eq}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\right)}} \quad (35)$$

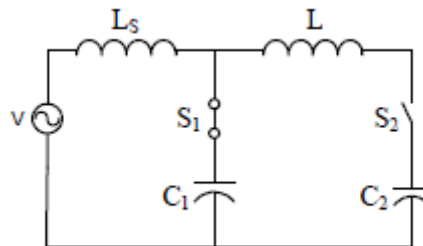
Conforme mencionado anteriormente, neste primeiro evento transitório, a carga é distribuída igualmente entre os bancos de capacitores. Isto acarreta na existência de uma tensão comum entre ambos os bancos e, conseqüentemente, na restauração do potencial da fonte de alimentação. Esta tensão comum pode ser determinada através da equação de conservação de carga:

$$C_1V_1(0) + C_2V_2(0) = (C_1 + C_2)V(\infty) \quad (36)$$

Onde: $V_1(0)$ e $V_2(0)$ são as tensões armazenadas inicialmente nos capacitores C_1 e C_2 e $V(\infty)$ é a tensão comum final em ambos os bancos. Ainda, ao se desprezar o amortecimento do circuito, sabe-se que a tensão através de C_2 pode alcançar valores na ordem de duas vezes esta tensão comum. Além disso, durante a restauração do potencial da fonte, o comportamento oscilatório do circuito ocorre devido à indutância do sistema L_S e às capacitâncias em paralelo.

O circuito equivalente ao segundo evento transitório é apresentado na Figura 22.

Figura 22: Circuito equivalente ao segundo evento transitório.



Fonte: Adaptado pelo autor de SUWANASRI *et al.* (2009, p. 2).

A frequência de oscilação e a corrente de energização, referentes ao segundo transitório, podem ser obtidas através de:

$$I_{inrush} = [V_P - V(\infty)] \sqrt{\frac{C_1 + C_2}{L_S}} \text{sen}(\omega_2 t) \quad (37)$$

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S(C_1 + C_2)}} \quad (38)$$

A tensão de pico deste evento (que é maior do que a do primeiro transitório) pode ser determinada por:

$$V_{P2} = V(\infty) + 2(V_P - V(\infty)) \quad (39)$$

Observa-se ainda que, durante estes dois eventos transitórios, a tensão da fonte de alimentação se mantém praticamente inalterada.

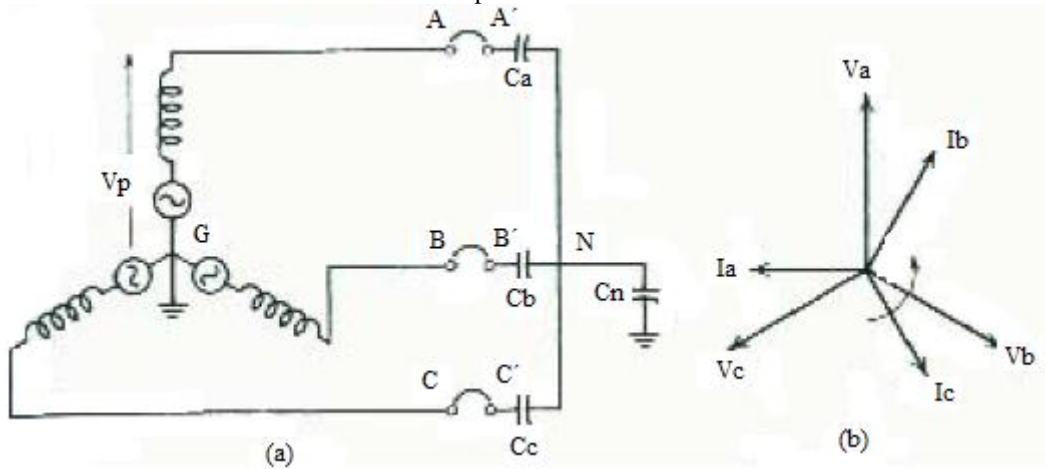
3.2.5 Análise de Transitórios em Bancos de Capacitores Trifásicos

A análise de sistemas trifásicos envolvendo bancos de capacitores é um assunto de extrema importância, uma vez que o uso destes equipamentos vem aumentando consideravelmente com a finalidade de corrigir o fator de potência e a regulação de tensão (GREENWOOD, 1991). Esses bancos são chaveados constantemente à medida que as condições da carga variam no sistema, podendo acarretar em sobretensões transitórias. Essas sobretensões se tornam ainda mais severas caso ocorra um reacendimento do arco (*restrike*) no disjuntor.

Estudar-se-á o comportamento de um banco trifásico de capacitores conectados em estrela aterrada, uma vez que, em geral, essa configuração é a mais comumente encontrada em subestações de energia.

Na Figura 23(a) as fases A, B e C do banco de capacitores são representadas pelos capacitores C_A , C_B e C_C , respectivamente. O capacitor C_N representa a capacitância efetiva do banco em relação ao terra do sistema. Estando o banco energizado em regime permanente, a simetria do circuito faz com que C_N esteja inicialmente descarregado. A Figura 23(b) apresenta a relação fasorial existente entre as correntes e tensões.

Figura 23: (a) Diagrama de um banco de capacitores trifásico. (b) Relação fasorial quando I_A passa por zero.



Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 133).

Supondo que, no momento de abertura da chave, a fase A seja a primeira a ser interrompida, a corrente I_A será nula quando a tensão V_A estiver no seu valor de pico. A Figura 23(b) representa esta suposição. Uma vez que o capacitor C_A não pode ser descarregado, este retém toda a tensão de pico (de linha para o neutro) V_P (GREENWOOD, 1991). Os valores instantâneos das correntes I_B e I_C serão iguais em módulo (porém com sinais opostos) a: $\left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_P\omega C$.

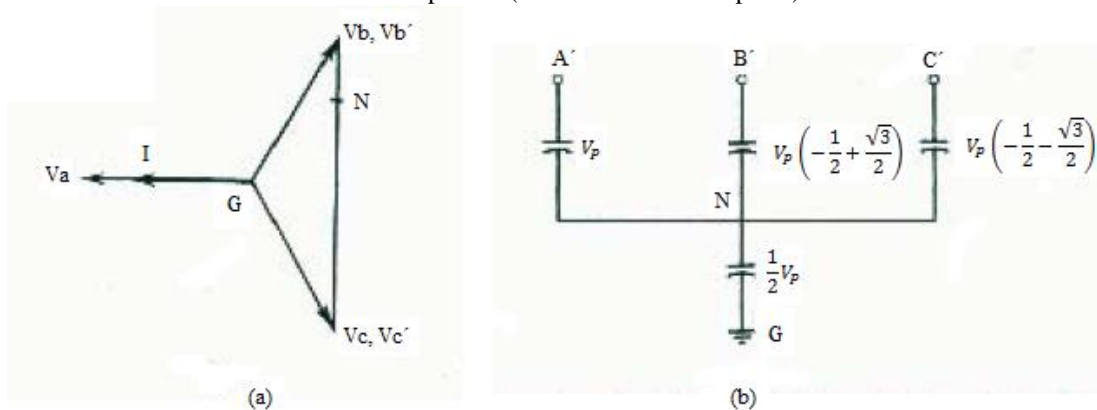
É possível fazer as seguintes observações sobre o circuito da Figura 23(a):

- As tensões V_B e V_C serão instantaneamente iguais a $-V_P/2$;
- As fases B e C formam um circuito simples, no qual a corrente $I = I_B = -I_C$ inicialmente carrega o capacitor C_B e descarrega C_C . Isto faz com que o potencial do neutro, N , se eleve em relação ao terra do sistema. Sendo assim, a corrente I flui em direção ao capacitor C_N ;
- A corrente I iniciará em seu valor máximo no instante em que a fase A é interrompida ($V_{BC} = 0$). Em seguida, ela diminuirá, alcançando o valor de zero um quarto de ciclo mais tarde, quando V_{BC} estiver em seu valor de pico ($\sqrt{3}/V_P$);

- Durante este um quarto de ciclo, a carga adicionada ao capacitor C_B e removida de C_C será: $Q = \int_0^t I dt = \frac{\sqrt{3}}{2} V_P \omega C \left(\int_0^{\pi/2\omega} \cos(\omega t) dt \right) = \frac{\sqrt{3}}{2} V_P C$. A Variação de potencial nestes capacitores será dada por: $\frac{\sqrt{3}}{2} V_P$.

Na Figura 24 estão representadas as condições de tensão existentes no banco para o instante de tempo mencionado. Assumindo-se que $C_N \ll C$ e, por conseguinte, que a corrente que percorre este capacitor é desprezível, sendo as fases B e C também interrompidas, as tensões existentes ficarão retidas nos capacitores.

Figura 24: (a) Diagrama fasorial quando as correntes das fases B e C atingem o zero. (b) Tensão retida no capacitor (fases B e C interrompidas).



Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 134).

Segundo Greenwood (1991), se faz necessário analisar a tensão máxima que surge nos polos do disjuntor. Esta tensão pode acarretar em reacendimentos de arco (*restrikes*) no equipamento e, conseqüentemente, a eventos transitórios de elevadas magnitudes.

Na Figura 24(b), com as tensões retidas nos capacitores, o potencial de um dos lados de cada polo da chave é fixo. Os outros lados permanecem alimentados pela fonte de energia. Assim, a máxima tensão no disjuntor ocorrerá quando os potenciais dos lados da fonte atingirem um valor de mesma magnitude, porém com polaridade oposta, ao da carga retida no banco de capacitores. Note que, nesse caso, as tensões máximas serão iguais a:

- **Fase A:**
 $2,5V_P$ – Ocorrendo 90° após as fases B e C serem interrompidas (e a cada 360° subsequentes);
- **Fase B:**
 $\left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_P$ – Ocorrendo 210° após as fases B e C interrompidas (e a cada 360° subsequentes);
- **Fase C:**
 $\left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right)V_P$ – Ocorrendo 150° após as fases B e C interrompidas (e a cada 360° subsequentes).

Supondo agora que as fases B e C não sejam interrompidas 90° após a fase A, pode-se comprovar que isto acarretará em tensões mais elevadas no circuito. Conforme representado na Figura 23(a), considera-se a tensão através do polo A, $V_{AA'}$ (potencial de A' em relação à A), igual a:

$$V_{AA'} = V_{A'C'} - V_{AC} \quad (40)$$

Neste caso, como a fase C não é interrompida, C e C' estarão no mesmo potencial (GREENWOOD, 1991). Sabe-se ainda que a tensão V_P estará retida no capacitor C_A no momento de extinção do arco, ou seja, $V_{A'N} = V_P$. Logo:

$$V_{A'C'} = V_{A'N} + V_{NC'} \quad (41)$$

Inicialmente, $V_{NC'} = 0,5V_P$. Após, soma-se a este valor metade da tensão fase-fase $V_{BC} = \sqrt{3}V_P \text{sen}(\omega t)$. Então, a tensão $V_{NC'}$ será dada por:

$$V_{NC'} = V_P \left(0,5 + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{sen}(\omega t) \right) \quad (42)$$

Substituindo a Equação (42) em (41) tem-se:

$$V_{A'C'} = V_P \left(1,5 + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{sen}(\omega t) \right) \quad (43)$$

Na fonte:

$$V_{AC} = \sqrt{3}V_P \text{sen} \left(\omega t + \frac{\pi}{3} \right) = \sqrt{3}V_P \left(\frac{1}{2} \text{sen}(\omega t) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos(\omega t) \right) \quad (44)$$

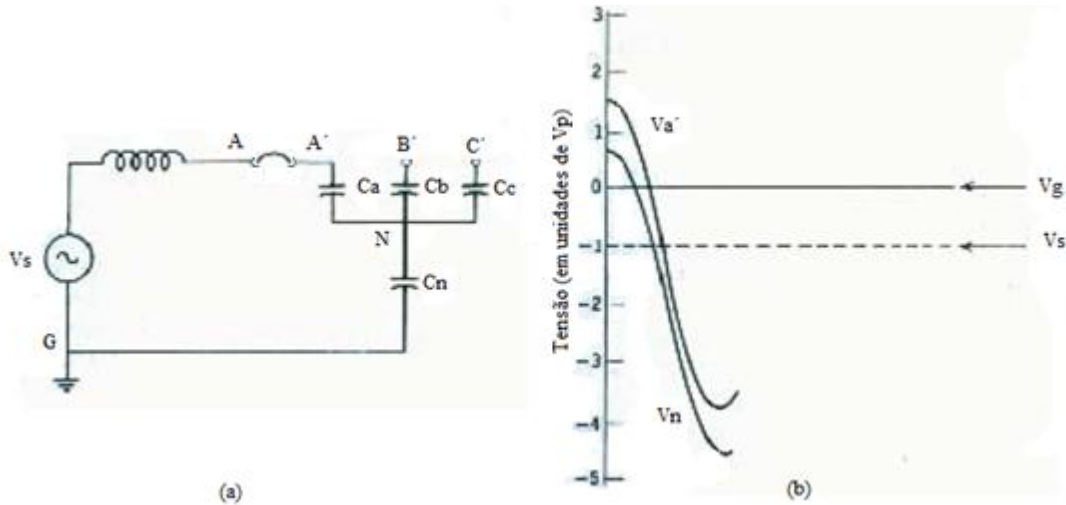
Combinando as Equações (40), (43) e (44) obtém-se:

$$V_{AA'} = 1,5V_P(1 - \cos(\omega t)) \quad (45)$$

Nota-se que, 180° após o polo A ser interrompido, haverá uma tensão de $3V_P$ sobre os seus contatos. Esta tensão é maior do que a existente no caso das fases B e C estarem interrompidas ($2,5V_P$).

É de interesse, também, avaliar o caso em que o disjuntor não consegue suportar a tensão a qual é submetido, acarretando em correntes de restabelecimento e reacendimentos de arco. Considera-se um banco trifásico, como o representado na Figura 24(b), no qual a fase A é interrompida primeiramente, sendo as fases B e C interrompidas 90° depois. Ainda, supõe-se que ocorra um *restrike* na fase A (do disjuntor) no momento em que a sua tensão atinge o valor de pico de $2,5V_P$. A Figura 25 representa a suposição feita, onde L é a indutância do sistema e C_N é a capacitância efetiva do banco em relação ao terra do sistema.

Figura 25: (a) Circuito equivalente de um banco de capacitores trifásicos com a ocorrência de um reacendimento de arco no disjuntor. (b) Excursão de tensão após a ocorrência de um *restrike* devido ao chaveamento de um banco trifásico.



Fonte: Adaptado pelo autor de GREENWOOD (1991, p. 137).

Além disso, consideram-se as seguintes condições iniciais para o circuito da Figura 25(a):

- **Tensão da fonte:**
 $V_S = -V_P;$
- **Tensão no capacitor C_A :**
 $V_{A'N} = V_P;$
- **Tensão no capacitor C_N :**
 $V_{NG} = 0,5V_P.$

Sabe-se que uma corrente transitória irá percorrer o circuito da Figura 25(a), entre a fonte e o banco de capacitores. Considera-se C_1 como o capacitor equivalente à combinação série de C_A e C_N , ou seja, $C_1 = \frac{C_A C_N}{(C_A + C_N)}$. Uma vez que $C_A \gg C_N$, o capacitor C_1 será aproximadamente igual a C_N . Sendo assim, a frequência da corrente transitória será dada por:

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} \quad (46)$$

Quando a chave do circuito da Figura 25(a) é fechada, a magnitude da corrente transitória pode ser obtida pelo quociente entre a tensão existente nos contatos do disjuntor e a impedância característica do circuito. Logo:

$$I = \frac{2,5V_P}{\sqrt{\frac{L}{C_1}}} \text{sen}(\omega_0 t) \quad (47)$$

Esta corrente I carrega o capacitor, fazendo com o potencial deste varie (ao se desprezar o amortecimento) entre a tensão da fonte e o dobro da tensão inicial existente entre os contatos do disjuntor. Ainda, como $C_A \gg C_N$, a maior parte dessa variação de potencial irá aparecer através do capacitor C_N .

Além disso, assume-se que toda a tensão do circuito da Figura 25(b) seja retida no capacitor C_N . Assim, quando o potencial deste atinge o valor de $-4,5V_P$, o disjuntor não consegue (em geral) interromper a corrente, ocasionando um *restrike* em um dos outros polos ou ambos (GREENWOOD, 1991).

Desta forma, a variação de tensão no neutro do banco de capacitores se mistura aos potenciais dos pontos B' e C' , os quais estão rigidamente acoplados através dos capacitores C_B e C_C . Uma vez que $V_{NG} = -4,5V_P$ tem-se que: $V_{B'G} = \left[-4,5 + \left(\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}\right)\right] V_P = -4,134V_P$ e $V_{C'G} = \left[-4,5 + \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{2}\right)\right] V_P = -5,866V_P$.

Considerando agora os valores instantâneos, $V_{BG} = V_{CG} = 0,5V_P$, obtém-se que as tensões através das fases B e C (no instante de tempo analisado) serão: $V_{B'B} = -4,634V_P$ e $V_{C'C} = -6,366V_P$.

É importante se atentar que as cargas armazenadas nos capacitores durante a primeira extinção do arco permanecem retidas no decorrer dos eventos transitórios subsequentes. Isto faz com a distribuição da tensão seja afetada durante esses transitórios.

3.3 MÉTODOS DE CONTROLE DAS SOBRETENSÕES E SOBRECORRENTES TRANSITÓRIAS ENVOLVENDO BANCOS DE CAPACITORES

Conforme descrito por Frontin *et al.* (2013), existem diversos métodos para se controlar as tensões e correntes transitórias, mitigando assim os seus impactos no sistema. Os principais métodos de controle são:

- Uso de reatores limitadores ou de amortecimento para limitar a corrente (valor de pico e frequência) transitória de energização e de descarga do banco de capacitores;
- Utilização de equipamentos de manobra com resistores ou indutores de pré-inserção. Estes dispositivos serão inseridos no circuito apenas durante a operação de manobra (sendo curto-circuitados após);
- Uso de dispositivos com chaveamento controlado (sincronizado). Estes equipamentos determinam o instante mais favorável para o fechamento e/ou abertura do disjuntor. Desta forma, as tensões e correntes transitórias resultantes são minimizadas.

Ainda, segundo Das (2010), outras formas de se mitigar os transitórios devido ao chaveamento de bancos de capacitores são:

- Aplicação de para-raios próximos aos bancos de capacitores e aos demais equipamentos do sistema;
- Dividir o banco de capacitores em bancos menores (interligados), com o intuito de diminuir as perdas;
- Evitar a aplicação de capacitores em sistemas com multi-níveis de tensão, uma vez que há a probabilidade de ocorrer uma frequência de ressonância secundária no circuito;
- Na existência de cargas geradoras de harmônicos, é necessário substituir os bancos de capacitores por filtros capacitivos. Este é um método eficiente para se mitigar os transitórios e controlar distorções harmônicas;

- Ajustar os comutadores (taps) do transformador, para que seja considerado o aumento de tensão (em regime permanente) no sistema devido à instalação de bancos de capacitores.

Além disso, no que concerne à aplicação dos para-raios, para a proteção contra as sobretensões, é importante destacar que estes podem ser instalados:

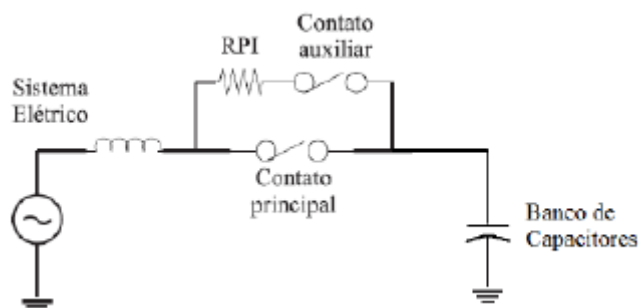
- Próximos aos disjuntores com o intuito de controlar a tensão de restabelecimento transitória (TRT) devido à desenergização dos bancos;
- No primário dos transformadores para limitar as tensões fase-fase, ocasionadas durante o chaveamento dos capacitores;
- No terminal de neutro dos bancos de capacitores não aterrados;
- Em sistemas magneticamente acoplados em baixa tensão.

3.3.1 Resistores ou Indutores de Pré-inserção

Segundo O'Leary e Harner (1988), o uso de resistores ou indutores de pré-inserção são métodos frequentemente utilizados pelas concessionárias de energia para mitigar os transitórios resultantes da energização dos bancos de capacitores. Estes métodos são aplicados também com o intuito de reduzir a interferência em circuitos de instrumentação devido ao chaveamento de bancos em contraposição (*back-to-back*).

Nesta aplicação, os dispositivos de manobra com resistores de pré-inserção fecham o contato do resistor antes de acionar o contato dos capacitores. Com isto, a severidade do transitório é reduzida através do aumento momentâneo das perdas (devido à adição dessa resistência) no circuito. Este aumento acarreta na diminuição dos valores de pico da tensão e corrente transitórias.

Figura 26: Modelo de circuito com resistores de pré-inserção.



Fonte: DE MOURA *et al.* (2012, p. 2).

É possível observar a partir da Figura 26, que estes resistores são instalados juntos às câmaras dos disjuntores, sendo sua utilização representada pelo fechamento sequencial de duas chaves. Durante a energização do banco fecha-se, inicialmente, o contato auxiliar, inserindo o resistor em série entre a fonte e o capacitor. Após um curto período de tempo (cerca de 6 milissegundos), o contato principal é acionado, curto-circuitando o resistor e colocando o banco no potencial (pleno) fornecido pela fonte (DE MOURA *et al.*, 2012).

Ainda, segundo Iizarry-Silvestrini e Vélez-Sepúlveda (2006), o resistor de pré-inserção é tipicamente mantido atuando no circuito por aproximadamente um quarto de ciclo na frequência de 60 Hz. Deste modo, se consegue reduzir o primeiro pico de sobretensão, o qual causa geralmente os piores danos ao sistema.

No entanto, segundo De Moura *et al.* (2012), esta aplicação é usualmente utilizada apenas em sistemas de transmissão (acima de 230 kV), devido a dificuldade de se encontrar resistores de pré-inserção corretamente dimensionados para o uso em circuitos de distribuição.

3.3.2 Reatores Limitadores ou de Amortecimento

Neste método, os reatores limitadores são conectados em série com o banco de capacitores, com o intuito de reduzir as correntes de energização (*inrush*). Estes reatores aumentam a magnitude da impedância característica do circuito, diminuindo assim, o valor de pico da corrente (IIZARRY-SILVESTRINI e VÉLEZ-SEPÚLVEDA, 2006).

Uma vez que a corrente através do reator não pode variar instantaneamente, sabe-se que o efeito transitório das componentes de altas frequências é minimizado.

Além disso, muitas vezes os reatores limitadores são construídos com elevadas resistências para que ocorra o amortecimento dos eventos transitórios.

3.3.3 Chaveamento Controlado (Sincronizado)

Conforme descrito por Smeets *et al.*(2014), toda a operação de chaveamento provoca a propagação de sobretensões transitórias através do sistema. A severidade destes transitórios depende do instante em que o chaveamento ocorre.

Normalmente, este instante ocorre de forma aleatória, possibilitando o surgimento de elevadas tensões e correntes transitórias após a operação de disjuntores. Isto pode acarretar em estresses mecânicos e dielétricos nos próprios dispositivos de manobra, bem como nos demais componentes do sistema. Além disso, estes eventos podem causar também a degradação e a diminuição da vida útil destes equipamentos.

Sabe-se ainda que os transitórios gerados por chaveamentos em instantes aleatórios podem ser eliminados através de operações por chaveamento controlado (também chamado de chaveamento sincronizado). Este método leva em consideração as formas de onda de tensão e corrente instantâneas e por isso ele também é conhecido como chaveamento *point-on-wave* (DAS, 2010).

A aplicação do chaveamento controlado é bastante comum em manobras envolvendo bancos de capacitores *shunt*. Isto se deve pelo fato das cargas capacitivas possuírem um comportamento transitório bem definido (SMEETS *et al.*, 2014).

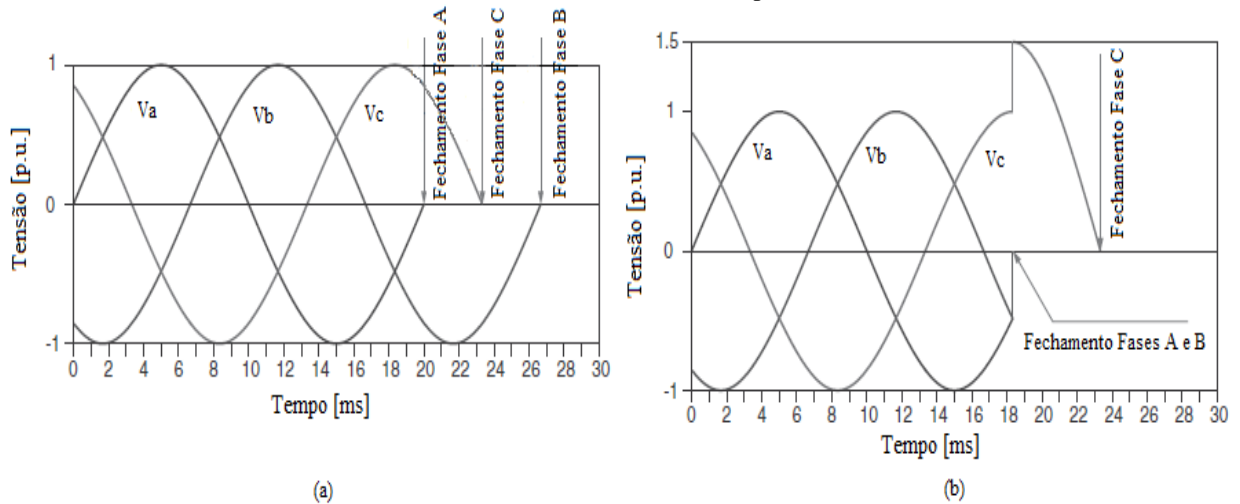
A manobra controlada de fechamento de bancos de capacitores se dá no sentido de minimizar a corrente de energização (*inrush*). Sabe-se que a energização de um banco único de capacitores acarreta em uma corrente de *inrush* que provoca uma queda de tensão no barramento onde este está localizado. Esta queda de tensão, apesar de não ser um problema para o disjuntor, afeta a qualidade da energia fornecida pela concessionária. Segundo Frontin *et al.* (2013), o instante ótimo para a energização do banco único de capacitores é aquele em que a tensão através do disjuntor atinge o valor zero. Isto requer, dependendo do banco ser ou não aterrado, diferentes ajustes no instante de fechamento de cada fase.

Uma vez que bancos ligados em estrela aterrada podem ser tratados como se fossem bancos trifásicos, o instante ideal para a sua energização ocorre no zero de

tensão de cada fase. Assim, todas as três fases devem ser fechadas defasadas de 120 graus elétricos, conforme mostrado na Figura 27(a).

Além disso, idealmente, bancos ligados em delta ou em estrela não aterrada devem ser energizados quando a diferença de tensão entre a primeira fase a fechar e as outras duas for aproximadamente zero. Deste modo, duas fases devem ser energizadas simultaneamente nos zeros de suas correspondentes tensões fase-fase, conforme representado na Figura 27(b). A terceira fase será fechada 90 graus elétricos após, no próximo instante zero da tensão fase-fase.

Figura 27: (a) Instante ótimo de chaveamento controlado de um banco de capacitores aterrado. (b) Instante ótimo de chaveamento controlado de um banco de capacitores não aterrado.



Fonte: Adaptado pelo autor de SMEETS *et al.* (2014, p. 325).

Sabe-se ainda que para bancos não aterrados, a tensão através do disjuntor correspondente a última fase a fechar terá uma amplitude de 1,5 vezes a tensão fase-terra (FRONTIN *et al.*, 2013). Isto ocorre devido ao deslocamento do potencial de neutro. Além disso, a probabilidade de reignição, nesta fase, aumenta.

No que concerne à manobra controlada de abertura de bancos de capacitores, esta permite a redução da probabilidade de reacendimentos no dispositivo de manobra. Isto se deve pela temporização da abertura de cada polo, aumentando, desta forma, a duração do arco e permitindo uma separação suficiente dos contatos do disjuntor no instante de interrupção deste. Ainda, segundo Frontin *et al.* (2013), o instante ótimo para a abertura do banco é associado a tempos de arco entre 4 e 6 milissegundos.

Além de melhorar a qualidade de energia e a mitigação dos transitórios no sistema, a aplicação do método de chaveamento controlado traz, igualmente, benefícios aos dispositivos de manobra. O desgaste das câmaras de interrupção do disjuntor é função da magnitude e da frequência das correntes de *inrush*. O fechamento sincronizado de bancos de capacitores permite a redução da magnitude destas correntes e, conseqüentemente, determina uma diminuição do desgaste elétrico do equipamento. Além disso, como as correntes de energização mais severas ocorrem na manobra de bancos em contraposição, esta condição de chaveamento é também aquela mais beneficiada pela adoção da manobra controlada. Este método, ainda, é altamente recomendado para a manobra de bancos de capacitores com alto número de operações.

3.4 INFLUÊNCIA DOS TRANSITÓRIOS NOS EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS DECORRENTES DA INSTALAÇÃO DE BANCOS DE CAPACITORES

Conforme mencionado anteriormente, é de grande interesse estudar os transitórios causados pelo chaveamento de bancos em derivação e os seus efeitos nos demais equipamentos que compõem o sistema. Segundo D'Ajuz (1987), deve-se analisar a influência destes transitórios nos equipamentos da subestação sob o ponto de vista de superação e especificação. O primeiro ponto está relacionado aos equipamentos já existentes no local e o segundo faz referência aos dispositivos que podem vir a ser adquiridos no futuro.

A seguir, realizar-se-á uma análise, para cada dispositivo de forma isolada, sobre os efeitos transitórios, decorrentes da instalação dos bancos de capacitores, na especificação e na aplicação dos equipamentos elétricos.

3.4.1 Disjuntores

Segundo D'Ajuz (1987), estes equipamentos devem ser capazes de interromper (e suportar fechados) o maior valor de corrente devido às manobras no sistema. A magnitude desta sobrecorrente está diretamente relacionada à: energização de um banco único de capacitores, energização de bancos em *back-to-back* e curtos-circuitos próximos aos bancos.

Além disso, é de interesse que os disjuntores utilizados na operação de manobra de capacitores sejam do tipo livres de reacendimentos de arco (CARVALHO *et al.*, 1995). Ainda, estes equipamentos deverão ser especificados para operar um número mínimo de manobras sem que haja necessidade de manutenção. Isto ocorre devido ao grande número de acionamentos aos quais os disjuntores estão sujeitos durante a sua vida útil.

3.4.2 Seccionadores

Devido ao fato dos seccionadores serem dispositivos de manobra que operam sem carga, eles deverão ser especificados para suportarem fechados o maior valor de corrente resultante das manobras dos bancos de capacitores (D'AJUZ, 1987).

3.4.3 Transformadores de Corrente (TC)

Os transformadores de corrente terão que suportar dinamicamente o maior valor de corrente gerado a partir da manobra dos bancos de capacitores. Além disso, eles deverão suportar também a maior sobretensão secundária devido à corrente de maior produto $I \times f$. Isto ocorre uma vez que a tensão em seus secundários é diretamente proporcional a este fator (IEEE C37.012, 2005).

Segundo D'Ajuz (1987), os valores de tensão no secundário dos transformadores de corrente geralmente são proibitivos para curtos-circuitos na subestação (ordem de dezenas de quilovolts). Sendo assim, estes equipamentos, na presença de bancos de capacitores, deverão conter dispositivos limitadores de tensão em seu secundário.

3.4.4 Para-raios

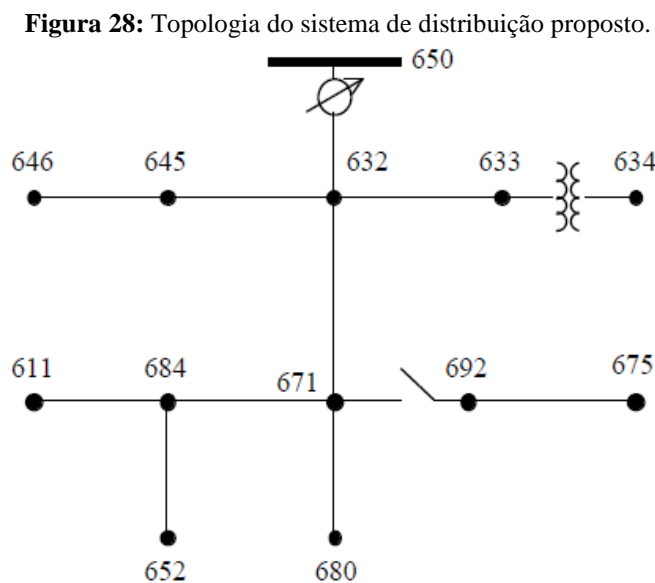
A aplicação de para-raios em subestações, onde serão instalados bancos de capacitores, está sujeita à análise dos desempenhos destes durante a ocorrência de descargas dos bancos. Este estudo trata da verificação das sobretensões transitórias quando de manobras (energização ou desenergização) de um banco único de capacitores (D'AJUZ, 1987).

A razão para este critério é que ao se iniciar a operação dos bancos, o primeiro a ser energizado é o que provoca maiores sobretensões. Já no caso em que se retira de operação tais bancos, o último é o que causará maiores sobretensões. Ainda, a presença de um segundo banco energizado (chaveamento *back-to-back*) faz com que as sobretensões sejam menores. Deste modo, a energia dissipada e a corrente que circula pelos para-raios são, conseqüentemente, menores também.

4 SIMULAÇÃO DE EVENTOS TRANSITÓRIOS DEVIDO ÀS MANOBRAS DE BANCOS DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO

Neste capítulo se propõe analisar, através do programa de simulação de transitórios eletromagnéticos EMTP/ATP[®] (*Eletromagnetics Transients Program/ Alternative Transient Program*), os efeitos transitórios decorrentes do chaveamento de bancos de capacitores *shunt* num sistema de distribuição. Para isto, utilizar-se-á a interface gráfica ATPDraw[®], que permite a modelagem de sistemas elétricos e, por conseguinte, a realização de medições e simulações de sinais, além do estudo do comportamento de transitórios.

A Figura 28 mostra a topologia do sistema de distribuição a ser estudado. Este sistema é adaptado de IEEE 13 *Buses Test Feeder* (2004).



Fonte: IEEE 13 *Buses Test Feeder* (2004, p. 2).

Os quadros 3, 4 e 5 apresentam os dados do circuito referentes: aos segmentos das linhas de transmissão, às cargas e aos transformadores, respectivamente. Estes dados representam os valores de interesse inseridos na simulação.

Quadro 3: Dados dos segmentos das linhas de transmissão.

De	Para	R (ohms/m)	X (ohms/m)	Distância (m)
632	645	$8,26 \times 10^{-4}$	$8,37 \times 10^{-4}$	152,4
632	633	$4,64 \times 10^{-4}$	$7,34 \times 10^{-4}$	152,4
645	646	$8,26 \times 10^{-4}$	$8,37 \times 10^{-4}$	91,44
650	632	$2,15 \times 10^{-4}$	$6,32 \times 10^{-4}$	609,6
684	652	$8,34 \times 10^{-4}$	$3,18 \times 10^{-4}$	243,84
632	671	$2,15 \times 10^{-4}$	$6,32 \times 10^{-4}$	609,6
671	684	$8,22 \times 10^{-4}$	$8,43 \times 10^{-4}$	91,44
671	680	$2,15 \times 10^{-4}$	$6,32 \times 10^{-4}$	304,8
671	692	0	0	-
684	611	$8,19 \times 10^{-4}$	$8,37 \times 10^{-4}$	91,44
692	675	$4,96 \times 10^{-4}$	$2,77 \times 10^{-4}$	152,4

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 4: Dados das cargas.

Barra	Conexão da carga	Fase-1	Fase -1	Fase -2	Fase -2	Fase -3	Fase -3
		kW	kVAr	kW	kVAr	kW	kVAr
634	Y	160	110	120	90	120	90
645	Y	0	0	170	125	0	0
646	D	0	0	230	132	0	0
652	Y	128	86	0	0	0	0
671	D	385	220	385	220	385	220
675	Y	485	190	68	60	290	212
692	D	0	0	0	0	170	151
611	Y	0	0	0	0	170	80
Total		1158	606	973	627	1135	753

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 5: Dados dos transformadores.

	kVA	kV- Alta Tensão (AT)	kV- Baixa Tensão (BT)	R (ohms) - AT	X (ohms) - AT	R (ohms) - BT	X (ohms) - BT
Subestação – entre 650 e 632	5000	115 – Delta (D)	4,16 Y Aterrada	39,675	317,4	0,017306	0,138445
Transformador entre 633 e 634	500	4,16 Y Aterrada	0,48 Y Aterrada	0,173056	1,211392	0,002304	0,016128

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Ainda, considerou-se, durante a modelagem do sistema, as seguintes observações:

- Na modelagem das cargas, onde o valor para as potências ativas (kW) e reativas (kVAr) é zero (Quadro 4), utilizou-se o valor de 10^9 para simular a resistência R e a reatância X referentes a estas fases;
- A chave (switch) entre as barras 671 e 692 foi considerada fechada durante toda a simulação. Deste modo, setou-se para as três fases os seguintes parâmetros: tempo de fechamento $t_{cl} = -1$ s e tempo de abertura $t_{op} = 100$ s.

Além disso, as configurações iniciais (*Settings*) do programa *ATPDraw*[®], utilizadas durante todas as simulações foram:

- **Passo de Integração:** $\Delta T = 10^{-6}$ s;
- **Tempo Máximo de Integração:** $T_{max} = 0.15$ s;
- **Indutância:** $X_{opt} = 60$ ohms;
- **Capacitância:** $C_{opt} = 60$ μ ohms;
- **Tolerância (para se considerar valor zero):** $Epsilon = 0$;
- **Frequência do Sistema:** $Freq = 60$ Hz;
- **Tipo de Simulação:** *Simulation type = Time domain.*

Para o cálculo dos dados de entrada das cargas utilizou-se as seguintes equações:

$$S_i^* = \frac{|V_{in}|^2}{Z_i} \therefore R_i + jX_i = \frac{|V_{in}|^2}{P_i - jQ_i} \quad (48)$$

$$S_{ik}^* = \frac{|V_{ik}|^2}{Z_{ik}} \therefore R_{ik} + jX_{ik} = \frac{|V_{ik}|^2}{P_{ik} - jQ_{ik}} \quad (49)$$

Onde i e k correspondem as fases do sistema (A, B e C) e n é o neutro.

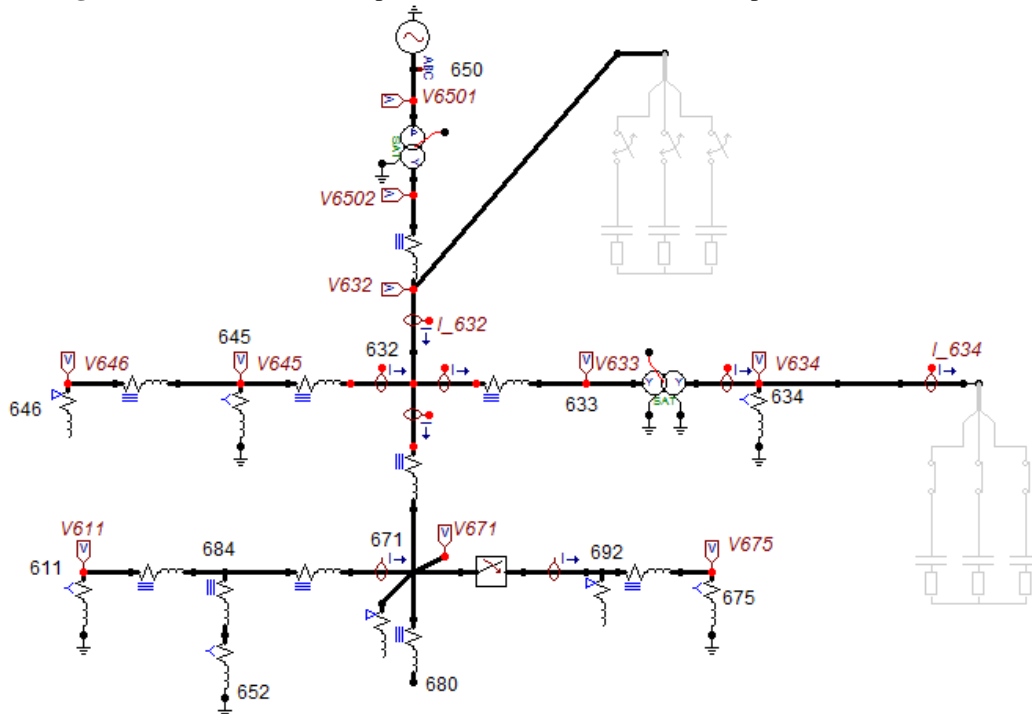
No que concerne a análise dos eventos transitórios devido ao chaveamento de bancos de capacitores, esta será dividida em duas etapas. A primeira corresponde a simulação das tensões e correntes do sistema da Figura 28 sem a instalação de

bancos no circuito (caso base). Já na segunda, considera-se o sistema com bancos de capacitores instalados (caso de interesse) e as influências destes no circuito.

4.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PROPOSTO - SEM BANCOS DE CAPACITORES CONECTADOS

O circuito da Figura 28 é modelado no software *ATPDraw*[®], conforme mostrado na Figura 29:

Figura 29: Circuito simulado para o caso base (sem bancos de capacitores instalados).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software *ATPDraw* (2016).

O tempo de simulação foi definido como sendo 0,15 s para todos os casos avaliados. Esta escolha se deve pelo fato do transitório ser um evento cuja duração no sistema é extremamente curta (na faixa de poucos milissegundos), conforme descrito por Greenwood (1991). Além disso, a simulação do circuito da Figura 29 apresenta a resposta em regime permanente do sistema (livre de transitórios).

Considera-se o caso base, onde não há a presença de bancos de capacitores conectados no circuito. As tensões de pico, para este sistema, nas barras 632 e 634

são dadas no Quadro 6. Ainda, são fornecidos os tempos da simulação, nos quais estas tensões foram obtidas.

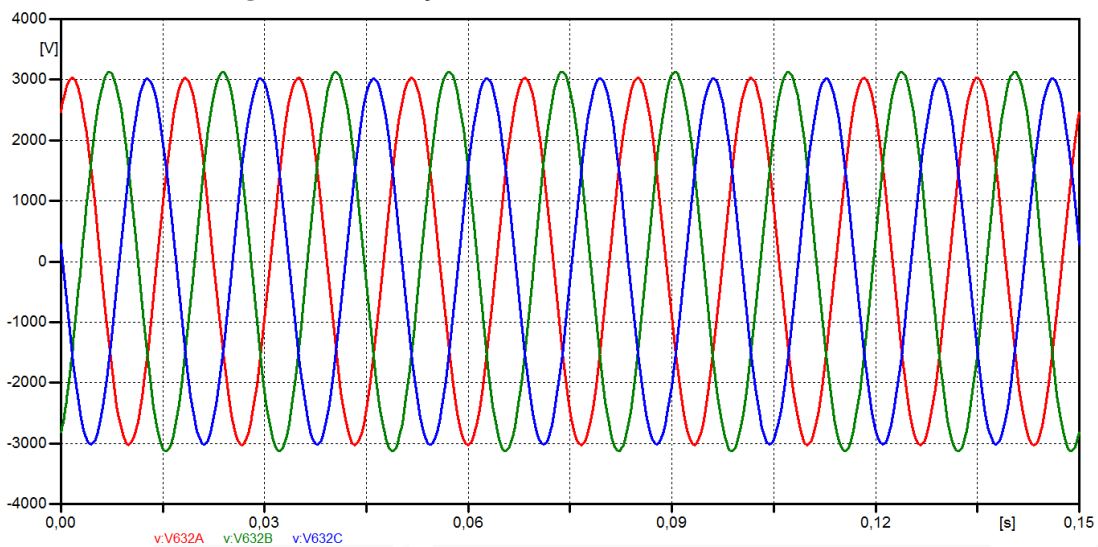
Quadro 6: Tensões nominais nas barras 632 e 634, sem bancos de capacitores instalados.

Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3027,5	0,0516	3130,2	0,0572	3018	0,0627
634	330,27	0,0517	345,28	0,0573	332,84	0,0629

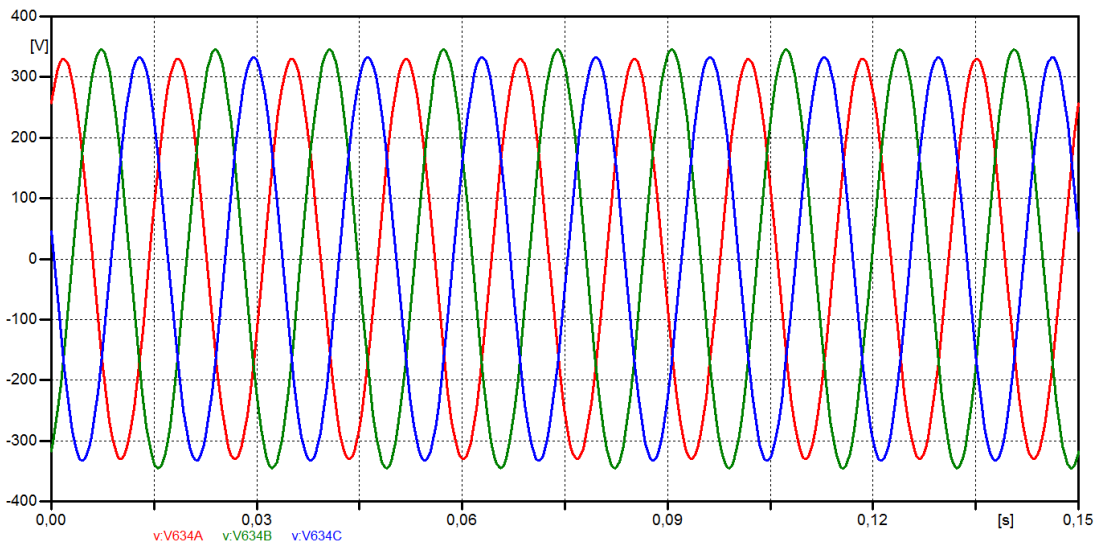
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

As Figuras 30 e 31 apresentam, respectivamente, as simulações das tensões de pico nos barramentos da subestação (632) e do consumidor (634) realizadas para o caso base.

Figura 30: Simulação das tensões nas três fases da barra 632.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 31: Simulação das tensões nas três fases da barra 634.

Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

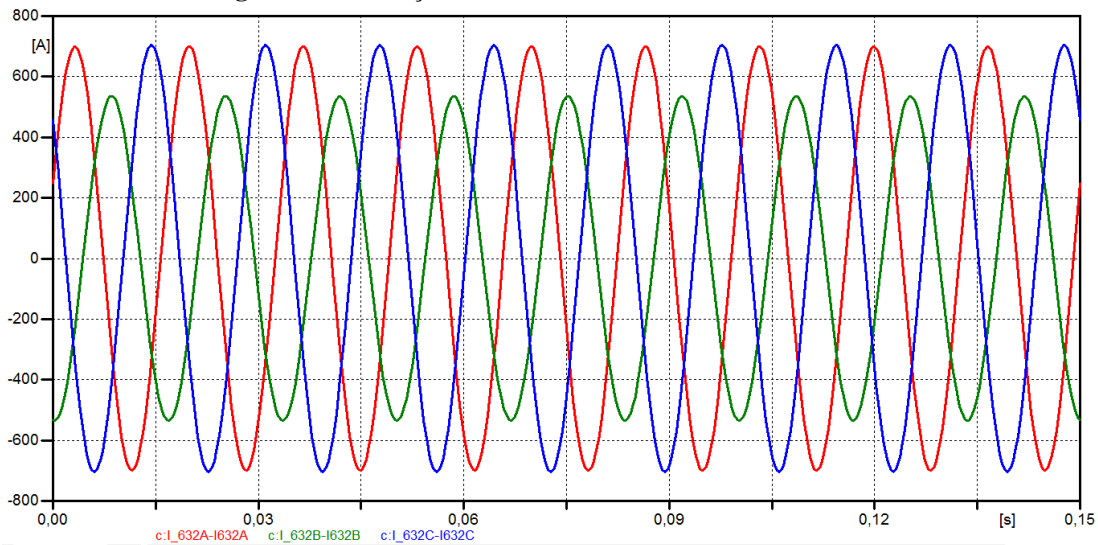
No que concerne as correntes de pico, o Quadro 7 apresenta os seus valores para as três fases das barras 632 e 634, bem como os tempos nos quais cada uma foi encontrada.

Quadro 7: Correntes nominais nas barras 632 e 634, sem bancos de capacitores instalados.

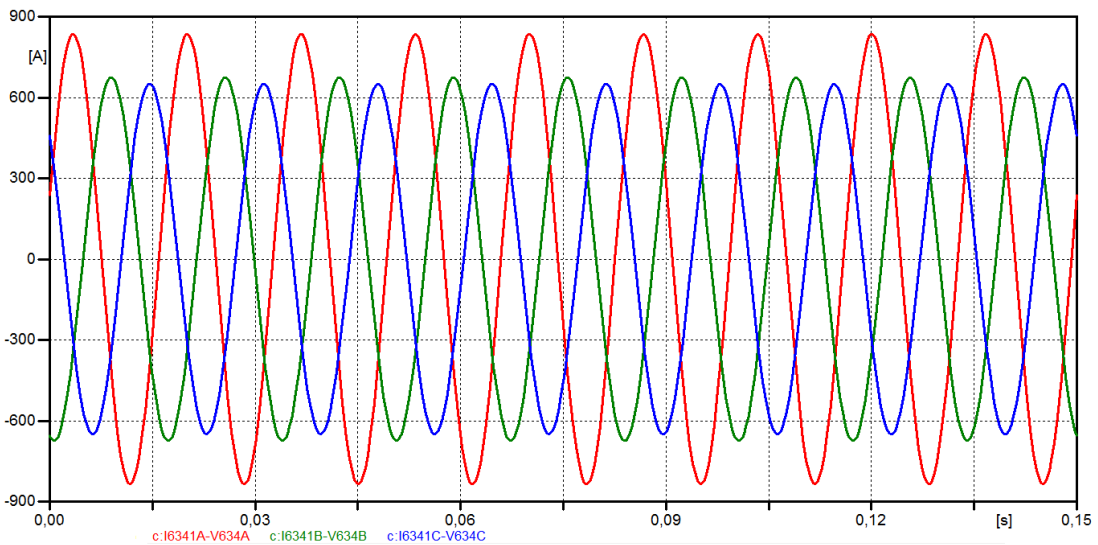
Barra	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	699,22	0,0532	535,13	0,0586	703,37	0,0643
634	835,08	0,0534	674,22	0,0589	650,14	0,0645

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

As Figuras 32 e 33 apresentam, respectivamente, as simulações das correntes de pico referentes as barras 632 e 634.

Figura 32: Simulação das correntes nas três fases da barra 632.

Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 33: Simulação das correntes nas três fases da barra 634.

Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

4.2 ANÁLISE DO SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO PROPOSTO - COM BANCOS DE CAPACITORES CONECTADOS

No que diz respeito à metodologia de análise dos eventos transitórios, serão investigados quatro casos de chaveamentos de bancos de capacitores distintos. Estudar-se-á também a forma de mitigação mais efetiva e comumente encontrada em sistemas de distribuição, a saber: o método de chaveamento controlado.

As quatro situações de manobra serão analisadas supondo que a empresa distribuidora instala capacitores, com potência de 400 kVAr (por fase), na barra 632 para regulação de tensão e compensação de potência reativa no sistema. Ainda, na barra 634, o consumidor instala capacitores para correção de fator de potência, com potência de 50 kVAr (por fase). Além disso, ambos os bancos estão conectados na configuração estrela aterrada.

Assim, as condições, onde se quantificarão as sobretensões e sobrecorrentes transitórias decorrentes do chaveamento dos bancos de capacitores, serão:

- **Caso 1:** Chaveamento de conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (barra 632) considerando os capacitores do consumidor (barra 634) desconectados;
- **Caso 2:** Chaveamento de conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (barra 632) considerando os capacitores do consumidor (barra 634) conectados;
- **Caso 3:** Chaveamento de conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (barra 634) considerando os capacitores da distribuidora (barra 632) desconectados;
- **Caso 4:** Chaveamento de conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (barra 634) considerando os capacitores da distribuidora (barra 632) conectados.

É possível perceber que os casos 1 e 3 representam as manobras de bancos únicos de capacitores, enquanto que 2 e 4 correspondem as manobras de bancos em contraposição (*back-to-back*). Ainda, para todos estes, considera-se que os capacitores são chaveados quando a tensão da fase A está no seu valor máximo (pior caso, conforme mencionado anteriormente).

Para o cálculo dos dados de entrada dos capacitores instalados nas barras 632 e 634, utilizou-se a Equação (50). As tensões nominais V_{fn} utilizadas no equacionamento foram: 2401,77 V (para o banco de capacitores da barra 632) e 277,13 V (para o banco da barra 634).

$$C = \frac{Q_{capacitiva}}{(V_{fn})^2 \times 10^{-9}} [\mu S] \quad (50)$$

Além disso, em todas as simulações realizadas, considerou-se $K_S = 0.15$, onde K_S é um fator adimensional utilizado para o cálculo da impedância série do capacitor. Ademais, em todas as análises, considerou-se os seguintes tempos de fechamento (T_{cl}) e abertura (T_{op}) das chaves (disjuntores):

- **Para os bancos de capacitores a serem manobrados:**

$T_{cl} = 0.052 \text{ s}$ (que corresponde aproximadamente ao instante de máxima tensão na fase A) e $T_{op} = 0.10 \text{ s}$;

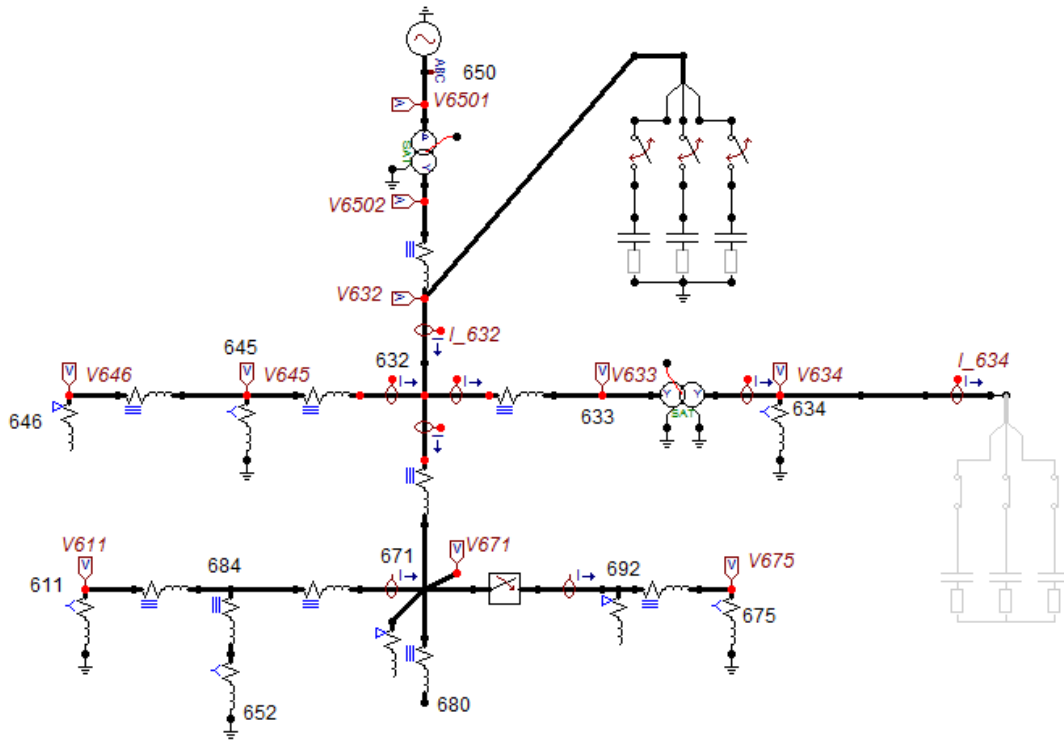
- **Para os bancos de capacitores fixos no sistema:**

$T_{cl} = -1 \text{ s}$ (que corresponde a chave estar inicialmente fechada) e $T_{op} = 1 \text{ s}$ (que é um valor bem maior que o tempo de 0.15 s proposto na simulação).

4.2.1 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 1

A Figura 34 apresenta o circuito simulado considerando a conexão e desconexão do banco de capacitores da concessionária de energia. Nesta modelagem, foram desconsiderados os capacitores na barra 634 (consumidor).

Figura 34: Circuito simulado para o caso 1 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 632 sem a existência do banco no barramento 634.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do *software* ATPDraw (2016).

Este sistema representa uma situação de manobra de um banco único de capacitores. Conforme visto anteriormente, esta condição de chaveamento apresenta elevadas sobretensões transitórias, tanto no local de sua instalação quanto em lugares remotos. Os Quadros 8 e 9 apresentam os valores das tensões de pico, simulados para as três fases, antes e após o chaveamento do banco.

Além disso, para o cálculo dos valores de tensões e correntes por unidade (*p.u.*), obtidas nas simulações, foram utilizadas, respectivamente, as Equações (51) e (52).

$$V_{pu} = \frac{V_{real}}{V_{base}} \quad (51)$$

$$I_{pu} = \frac{I_{real}}{I_{base}} \quad (52)$$

Quadro 8: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3027,1	0,0349	3130,4	0,0405	3017,9	0,046
634	330,27	0,0351	345,29	0,0489	332,75	0,0378

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 9: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).

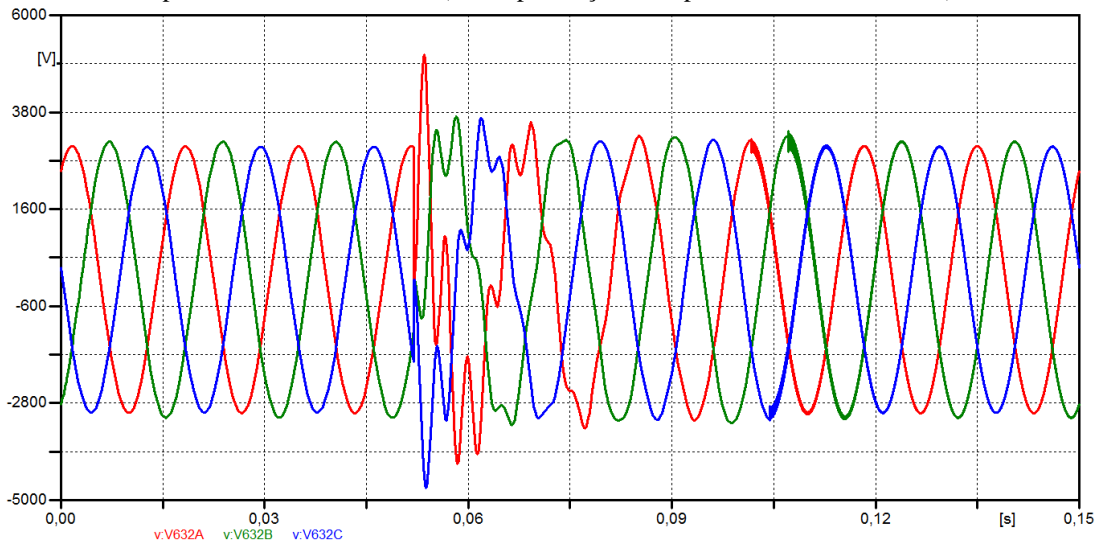
Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)
632	5095,7	0,0535	1,683	3697,8	0,0582	1,181	4719,1	0,0537	1,564
634	546,13	0,0535	1,654	409,1	0,0582	1,185	506,15	0,0537	1,521

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Nota-se que as maiores sobretensões ocorrem nas fases A de ambos os barramentos. Isto ocorre pelo fato do capacitor ser energizado no instante em que a tensão desta fase está excursionando pelo seu valor máximo. Além disso, sendo a frequência de oscilação neste caso maior do que a frequência fundamental (porém menor do que 1 kHz), a sobretensão é transferida, também, para a rede de menor nível de tensão (GREENWOOD, 1991).

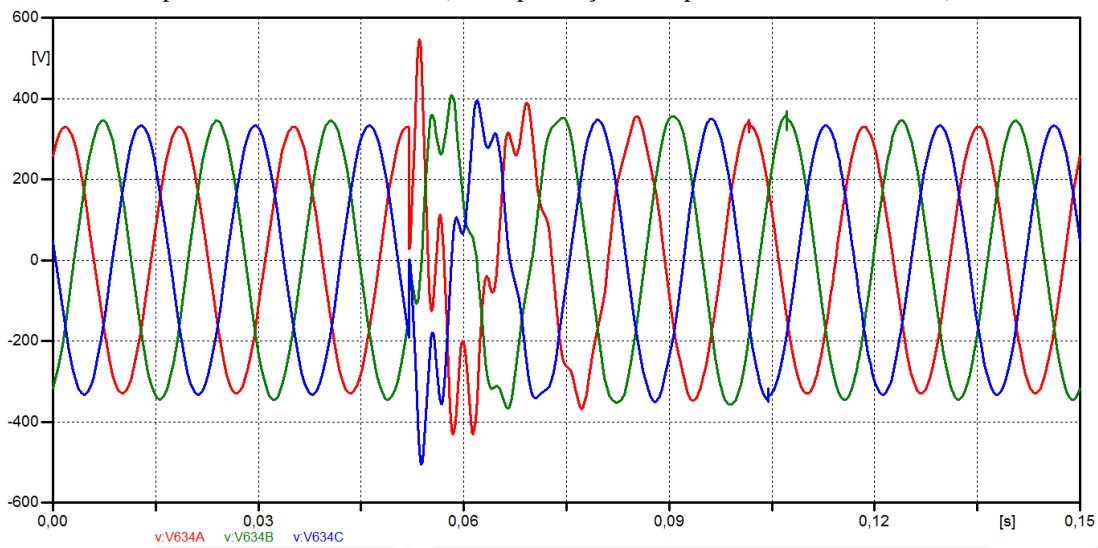
Estas sobretensões podem ser observadas através das Figuras 35 e 36. A Figura 35 mostra as o comportamento das tensões nas três fases da barra 632. Já a Figura 36 apresenta as sobretensões ocasionadas na barra 634 devido ao chaveamento do banco de capacitores instalado na subestação.

Figura 35: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 36: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

No que concerne as correntes transitórias, os Quadros 10 e 11 apresentam os valores obtidos referentes às correntes, pré-chaveamento e pós-chaveamento, que circulam nas barras 632 e 634.

Quadro 10: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	699,28	0,0365	535,1	0,0502	703,54	0,0477
634	835,01	0,0367	674,38	0,0339	650,16	0,0312

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

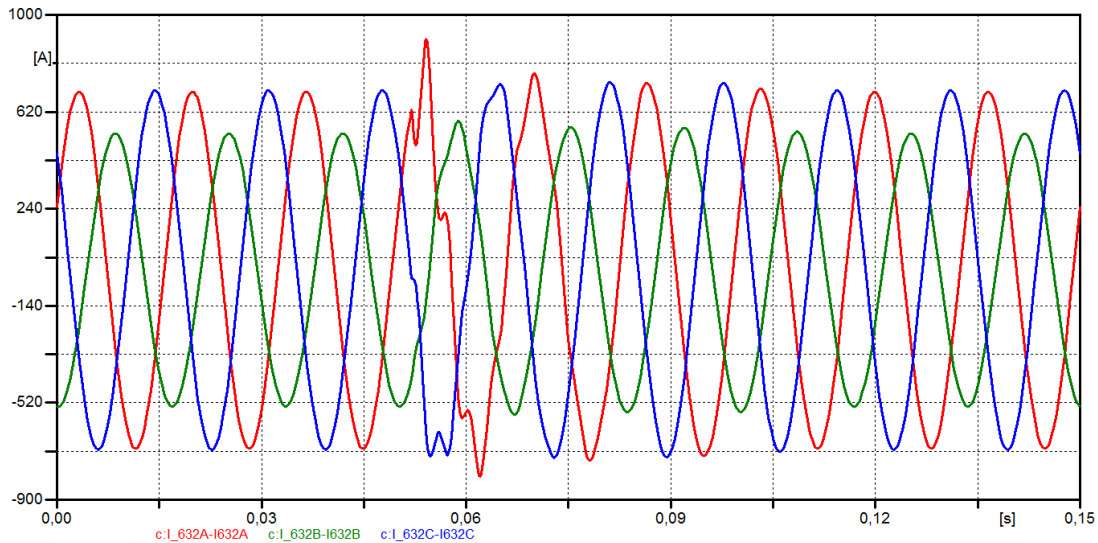
Quadro 11: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)
632	906,72	0,054	1,297	584,45	0,0588	1,092	729,85	0,0547	1,037
634	1048,6	0,0541	1,256	746,64	0,059	1,107	685,26	0,0573	1,054

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

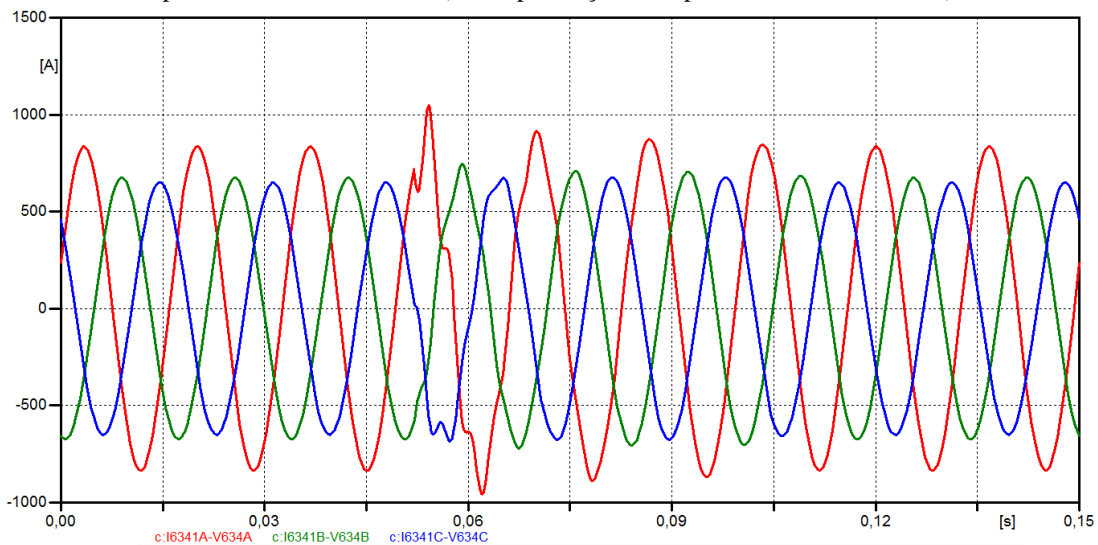
Como era de se esperar para o caso de manobra de banco único de capacitores, a magnitude das sobrecorrentes transitórias não é muito elevada, visto que a impedância do sistema limita estas correntes (FRONTIN *et al.*, 2013). Isto pode ser observado de forma melhor nas Figuras 37 e 38, as quais mostram, respectivamente, o perfil das correntes nas barras 632 e 634 durante a condição de chaveamento.

Figura 37: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 38: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores da distribuidora (sem a presença dos capacitores do consumidor).

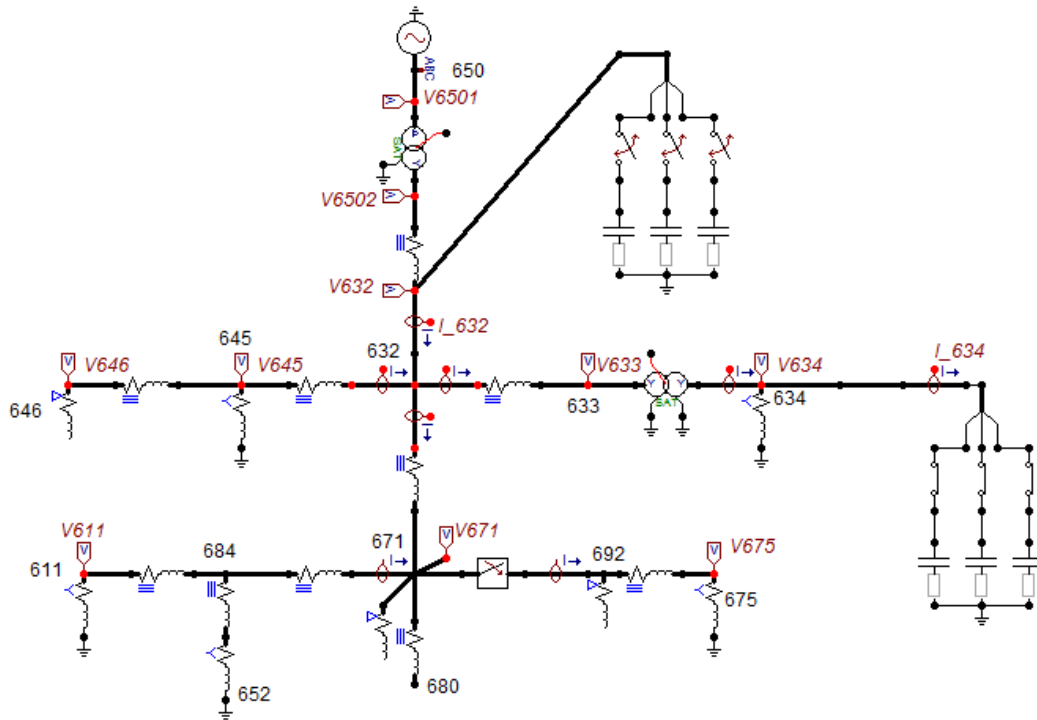


Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

4.2.2 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 2

Considera-se agora a condição de manobra do banco de capacitores da distribuidora (barra 632), com os capacitores do consumidor (barra 634) fixos no sistema. Esta condição, mostrada na Figura 39, reflete a situação do chaveamento de bancos em contraposição (*back-to-back*). Ainda, sabe-se que esta configuração de manobra possibilita o surgimento de elevadas sobrecorrentes transitórias no circuito.

Figura 39: Circuito simulado para o caso 2 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 632 com a existência do banco fixo no barramento 634.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Os Quadros 12 e 13 apresentam os valores das tensões nas barras 632 e 634, sendo que no Quadro 13 estão representados os níveis de sobretensões originadas devido o chaveamento em *back-to-back*.

Além disso, nos Quadros 14 e 15 são mostradas, respectivamente, as correntes antes e após a manobra do banco da distribuidora, bem como os valores (por unidade) das sobrecorrentes.

Quadro 12: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3040,6	0,0433	3145,1	0,0405	3031,3	0,046
634	338,73	0,0435	354,31	0,0323	341,31	0,0463

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 13: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)
632	4618,3	0,0534	1,519	3489,2	0,0559	1,109	4167,5	0,0536	1,375
634	924,3	0,0539	2,729	545,07	0,0552	1,538	807,02	0,0541	2,364

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 14: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	691,83	0,0447	527,36	0,0418	694,76	0,0476
634	753,54	0,0361	583,45	0,0331	562,35	0,0304

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

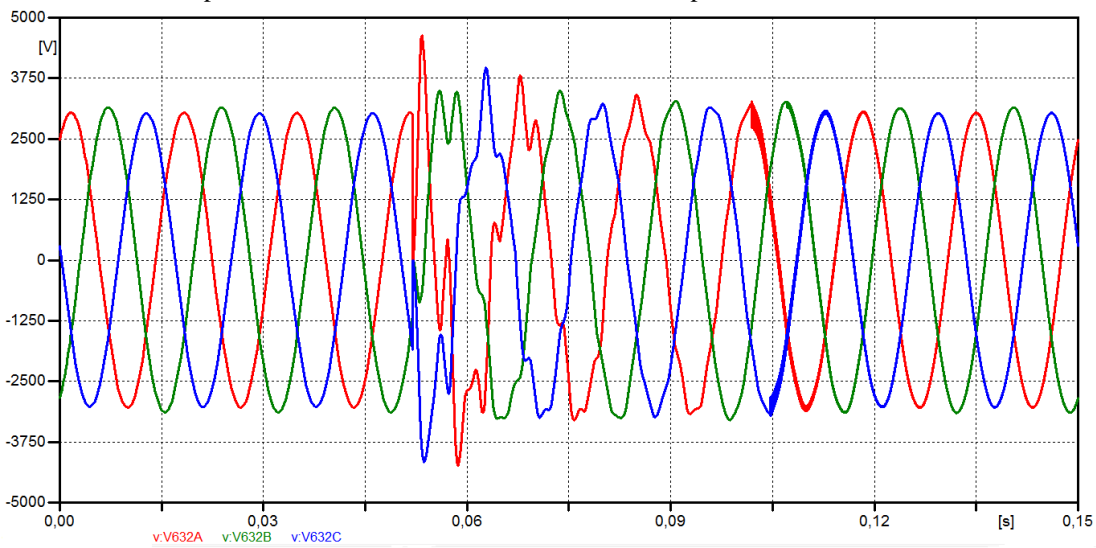
Quadro 15: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)
632	1001,4	0,0536	1,447	627,52	0,0588	1,190	841,51	0,0559	1,211
634	2879,7	0,0535	3,822	1205,8	0,0588	2,067	1927,3	0,0536	3,427

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

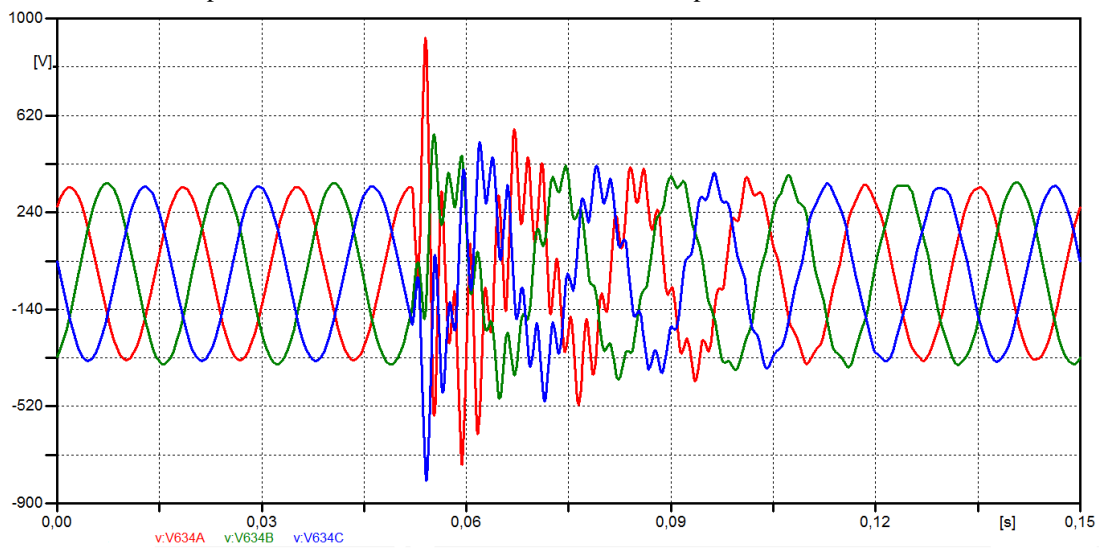
As tensões resultantes da conexão e desconexão do banco instalado na subestação, estando os capacitores do consumidor fixos no circuito, podem ser observadas através das Figuras 40 e 41.

Figura 40: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

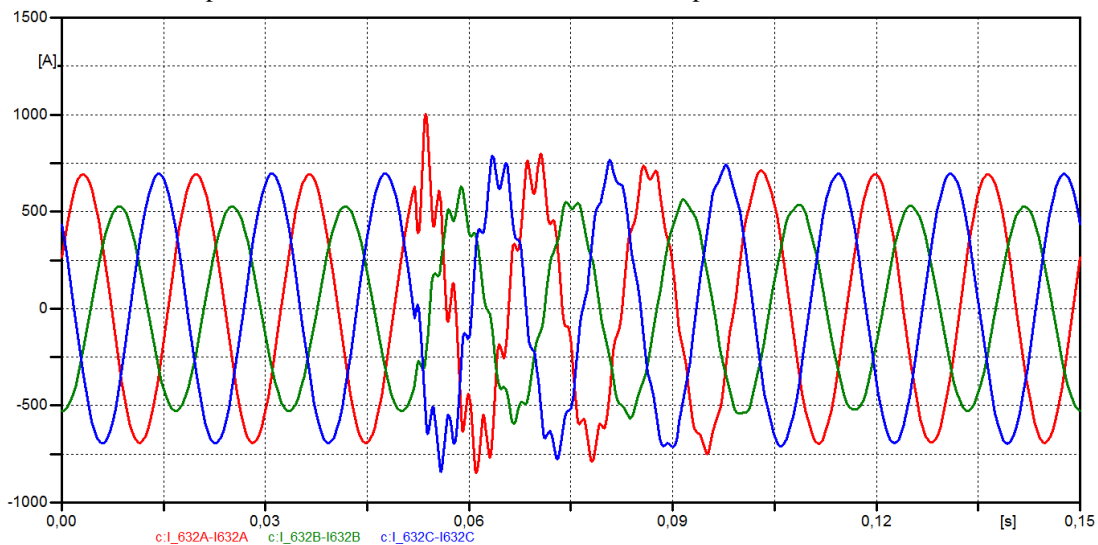
Figura 41: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

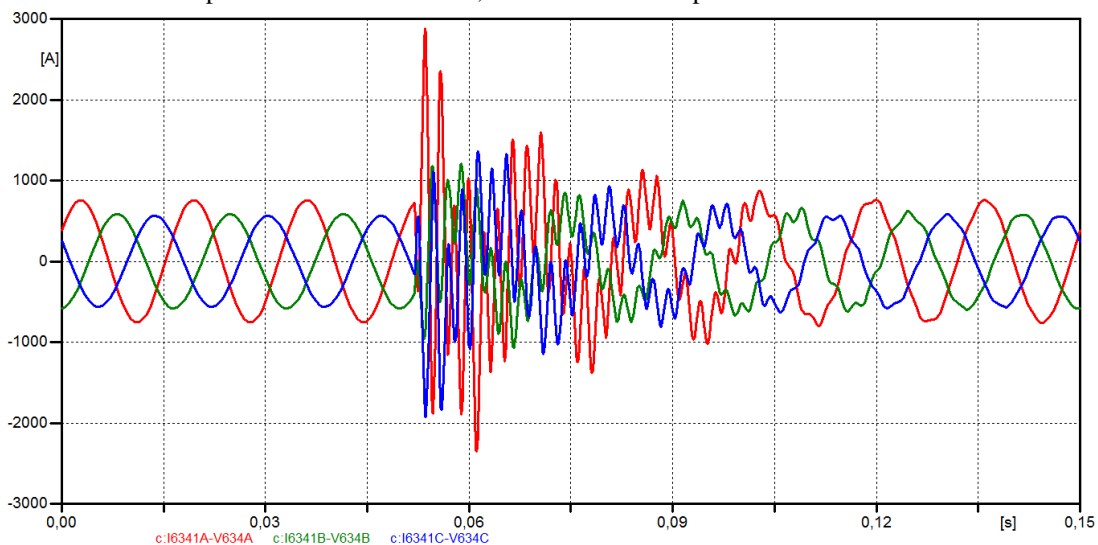
No que diz respeito ao comportamento das correntes no sistema, este pode ser observado nas Figuras 42 e 43. Nestas figuras estão representadas as sobrecorrentes transitórias correspondentes às barras 632 e 634, respectivamente.

Figura 42: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 43: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

A partir dos resultados obtidos, nota-se que a influência da energização e desconexão do banco de capacitores da distribuidora é mais sentida nos níveis de tensão e corrente do barramento da carga (consumidor). Isto ocorre, uma vez que os capacitores já energizados no sistema tendem a se descarregar com o intuito de auxiliarem na energização do próximo banco. Deste modo, os níveis das tensões, presentes no circuito, aumentam.

Ainda, como a contribuição da corrente de energização do banco é limitada apenas pela impedância do barramento, isto causa valores mais elevados de sobrecorrentes no sistema (D'AJUZ, 1985).

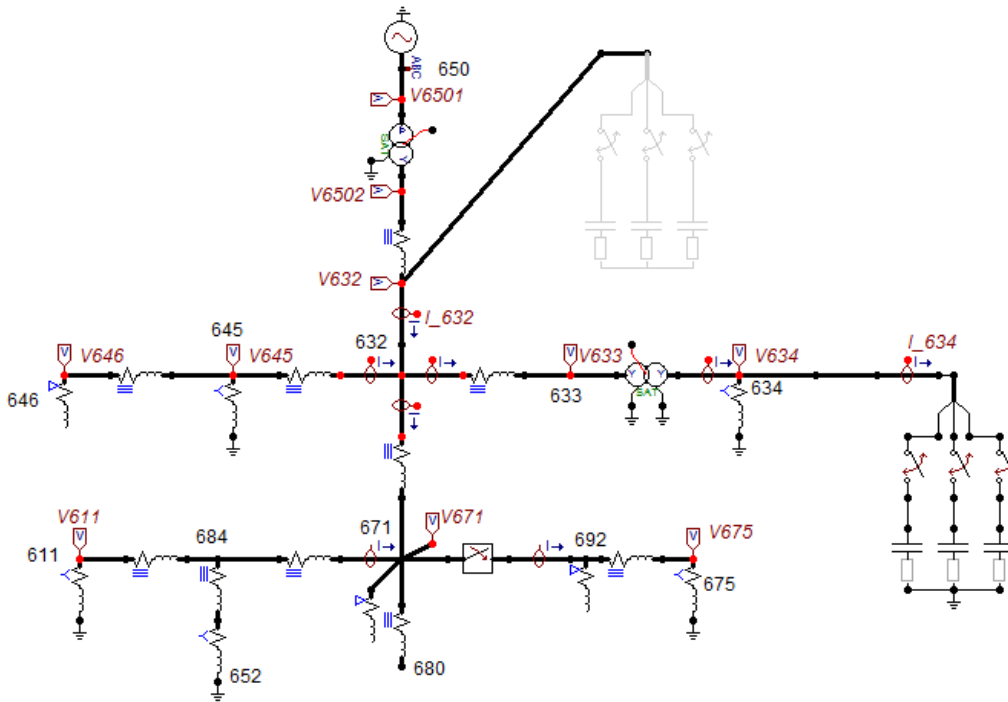
Ao se comparar os valores por unidade encontrados nas simulações do caso 2 com os do caso 1, percebe-se que a manobra de bancos em contraposição apresenta realmente tensões e correntes transitórias de maiores magnitudes. Isto fica evidente, principalmente, no que diz respeito ao barramento do consumidor.

Além disso, nota-se, mais uma vez, que as sobretensões e sobrecorrentes resultantes na fase A (de cada barramento) são maiores que nas demais fases, visto que as ondas de tensão e de corrente, no momento do chaveamento dessa fase, estão próximas de seus valores máximos.

4.2.3 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 3

Analisa-se agora o comportamento das tensões e correntes no sistema quando o banco de capacitores do consumidor da barra 634 é chaveado sem a presença do banco da subestação. A Figura 44 apresenta o circuito proposto.

Figura 44: Circuito simulado para o caso 3 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 634 sem a existência do banco no barramento 632.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Neste circuito, o consumidor da barra 634 instala capacitores com o intuito de corrigir o fator de potência (compensação da potência reativa). Além disso, o banco de capacitores da distribuidora encontra-se desconectado. O Quadro 16 apresenta os valores de tensão nas três fases dos barramentos da distribuidora e do consumidor. Já no Quadro 17 estão representadas as sobretensões induzidas pela manobra do banco único instalado na barra 634.

Quadro 16: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3027,5	0,0433	3130,1	0,0488	3017,9	0,046
634	330,27	0,0434	345,29	0,0489	332,84	0,0379

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 17: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).

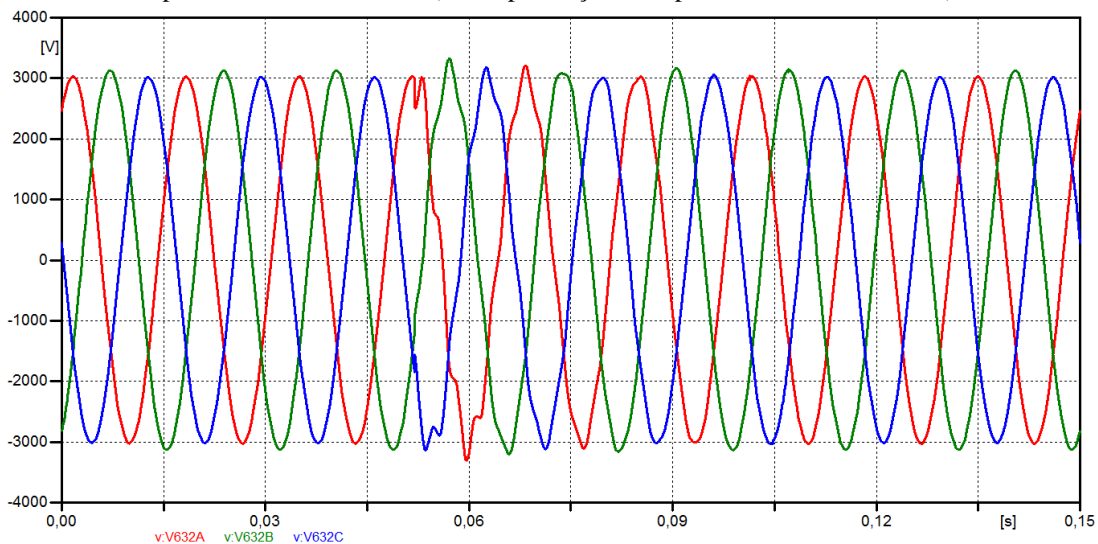
Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)
632	3301,1	0,0597	1,090	3328,0	0,057	1,063	3180,0	0,0625	1,054
634	600,94	0,0532	1,820	466,39	0,057	1,351	495,59	0,0534	1,489

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

É possível perceber que as magnitudes das sobretensões transitórias são mais brandas neste caso do que as obtidas no caso 1 (ambos os casos simulam manobras de bancos únicos). O motivo disso é o nível de tensão ao qual o capacitor está sujeito durante a sua energização, uma vez que esta tensão define a carga inicial neste.

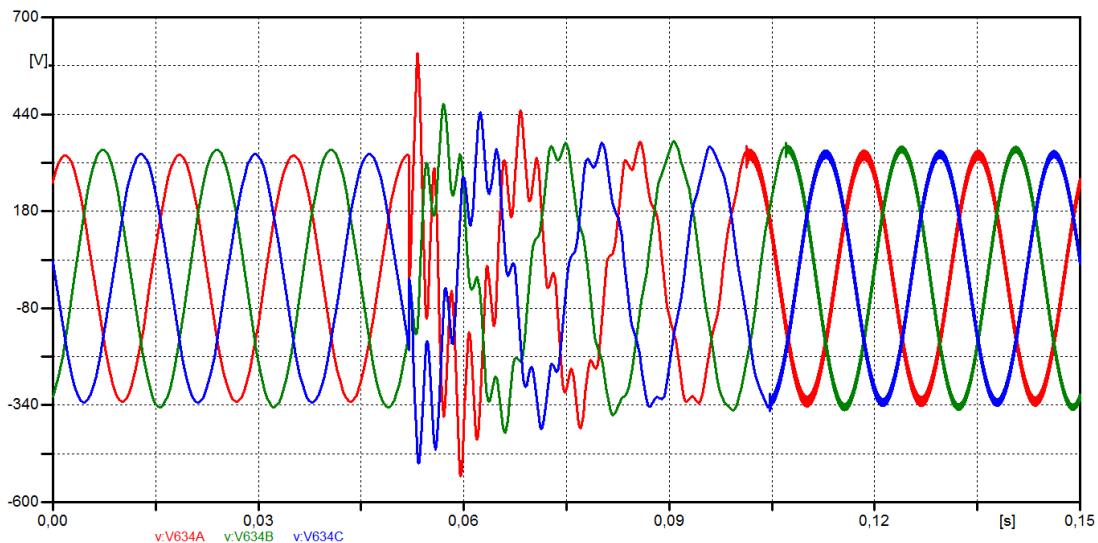
As sobretensões mostradas na Tabela 17 são observadas nas Figuras 45 e 46. A Figura 45 mostra as o comportamento das tensões nas três fases da barra da distribuidora. Já a Figura 46 apresenta as sobretensões ocasionadas na barra do consumidor devido ao chaveamento do banco conectado neste próprio barramento.

Figura 45: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 46: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do *software* ATPDraw (2016).

A partir da Figura 46, verifica-se o surgimento de uma onda, após a desconexão do banco, de alta frequência sobreposta à onda de tensão em 60 Hz. Isto ocorre pelo fato da onda resultante do chaveamento capacitivo não ser senoidal (D'AJUZ, 1985).

A seguir, os Quadros 18 e 19 apresentam, respectivamente, os valores de pico das correntes nas barras 632 e 634 e as sobrecorrentes transitórias originadas pela manobra do banco de capacitores no barramento da carga (barra 634).

Quadro 18: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	699,22	0,0365	535,13	0,0419	703,38	0,0476
634	835,01	0,0367	674,38	0,0339	650,16	0,0312

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

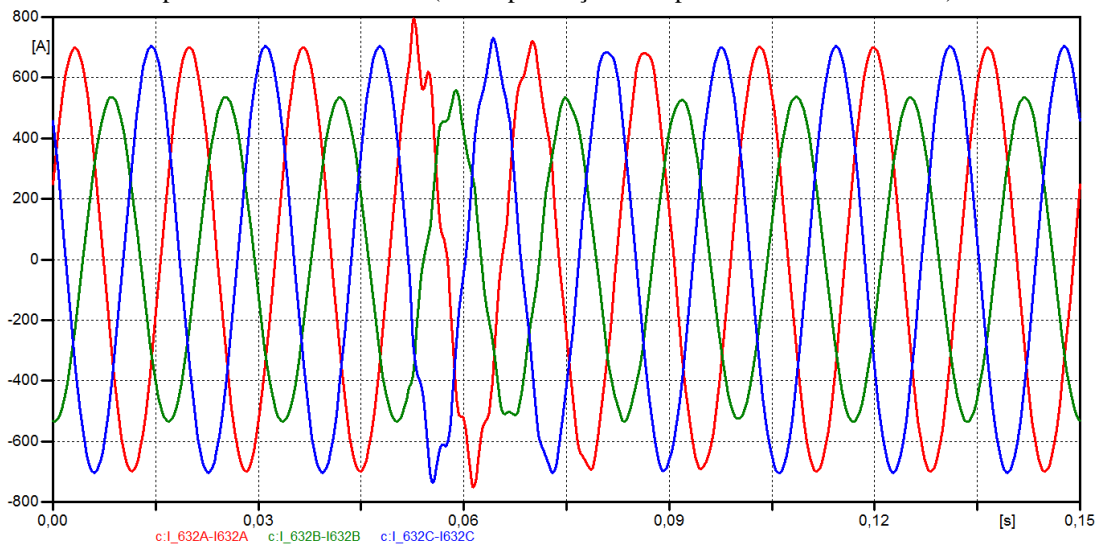
Quadro 19: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)
632	795,05	0,0527	1,137	557,67	0,0588	1,042	736,65	0,0554	1,047
634	1953,1	0,0525	2,339	931,49	0,0589	1,381	1163,5	0,0554	1,790

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

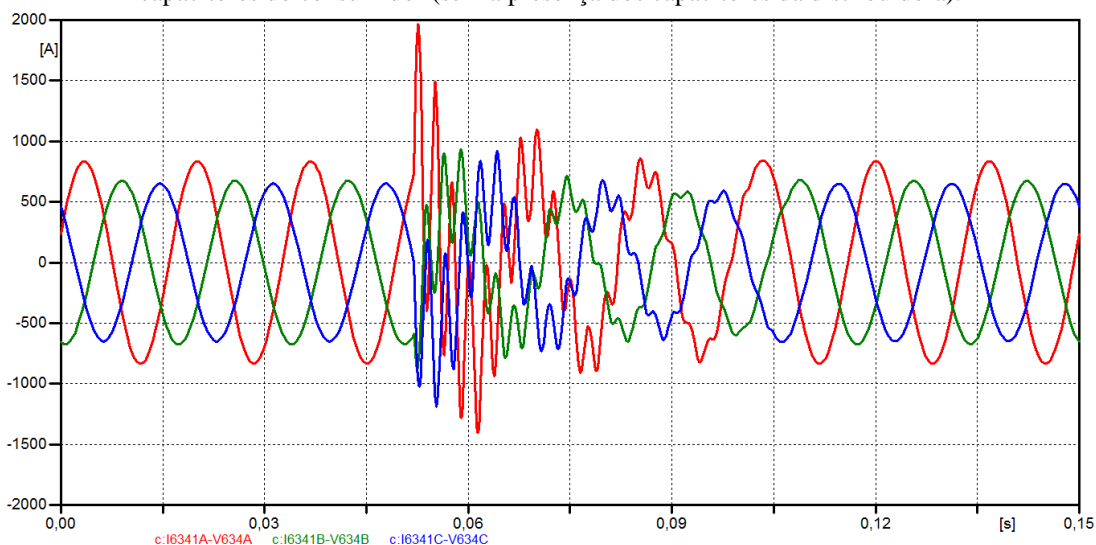
As ondas das correntes nas barras 632 e 634 são mostradas nas Figuras 47 e 48 respectivamente.

Figura 47: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 48: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão dos capacitores do consumidor (sem a presença dos capacitores da distribuidora).



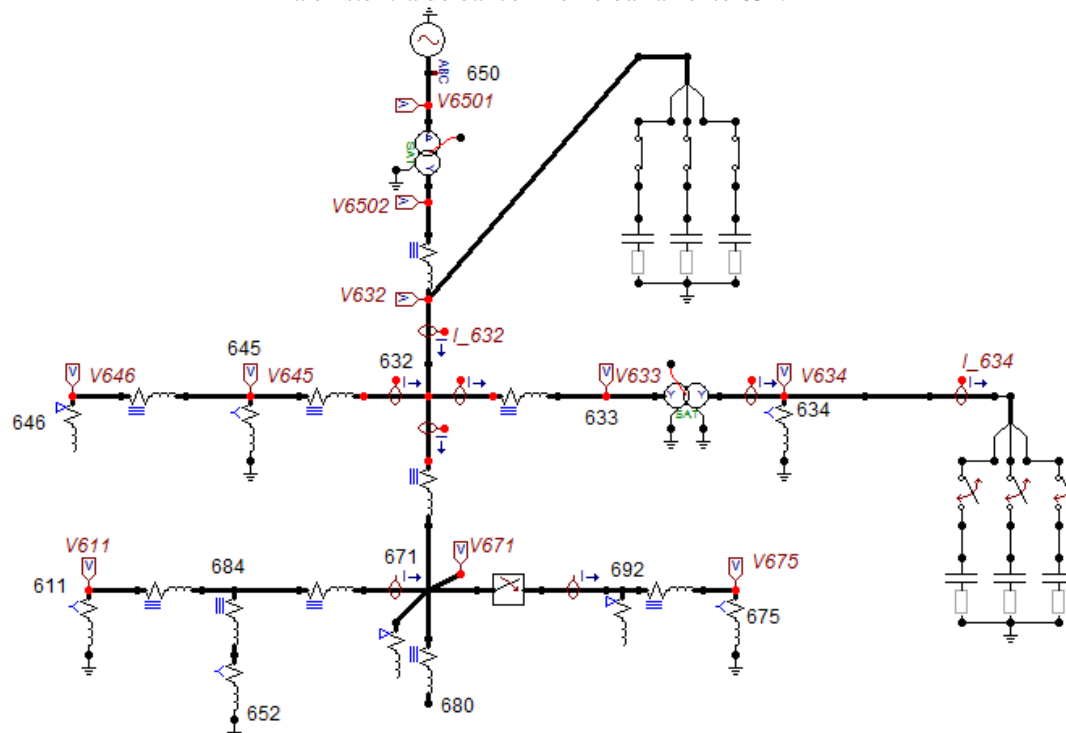
Fonte: Desenvolvido pelo autor através do *software* ATPDraw (2016).

A partir das Figuras 46 e 48, é possível perceber que as maiores sobretensões e sobrecorrentes transitórias são observadas na fase A do barramento do consumidor. Isto se deve pelo fato de o banco estar localizado nesta barra, fazendo com que a sua influência no barramento da subestação seja praticamente nula. Além disso, a chave, novamente, foi acionada no instante em que as ondas de tensão e corrente, nesta fase, estavam próximas as seus valores de pico.

4.2.4 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – CASO 4

No presente caso, estuda-se o comportamento do sistema devido à manobra do banco de capacitores do consumidor (barra 634), com os capacitores da distribuidora (barra 632) fixos no circuito. Esta condição de chaveamento é mostrada na Figura 49.

Figura 49: Circuito simulado para o caso 4 – conexão e desconexão dos capacitores na barra 634 com a existência do banco fixo no barramento 632.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

No circuito acima (assim como no caso 2), investiga-se as tensões e correntes transitórias provocadas pela manobra de bancos em contraposição. Os Quadros 20 e 21 apresentam os valores das tensões e sobretensões nas barras da distribuidora e da carga, respectivamente. Ainda, nos Quadros 22 e 23 estão representadas as correntes, nas barras 632 e 634, antes e após o chaveamento do banco do consumidor.

Quadro 20: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3152,7	0,0433	3265,2	0,0405	3142,2	0,0377
634	343,94	0,0352	360,14	0,0406	346,59	0,0462

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 21: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)
632	3499,8	0,0593	1,110	3369,2	0,065	1,032	3594,5	0,0542	1,144
634	595,24	0,053	1,731	442,99	0,0562	1,230	466,67	0,0628	1,346

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 22: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	728,15	0,0366	557,95	0,0419	732,67	0,0477
634	869,61	0,0451	703,38	0,0339	676,94	0,0479

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

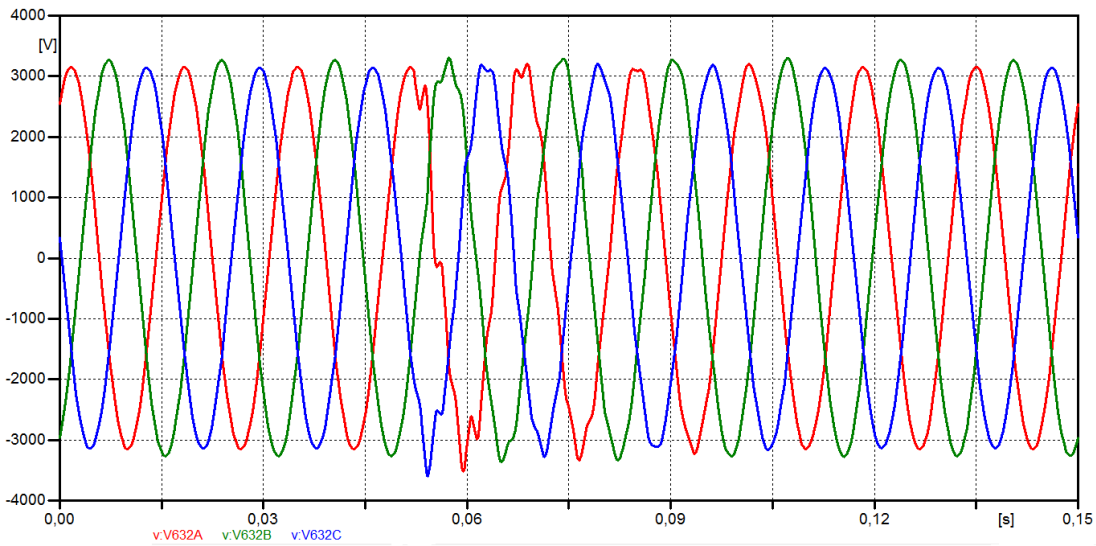
Quadro 23: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)
632	846,78	0,0526	1,163	591,52	0,0579	1,060	774,47	0,0644	1,057
634	2128,0	0,0525	2,447	1095,2	0,0579	1,557	1134,2	0,0569	1,675

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

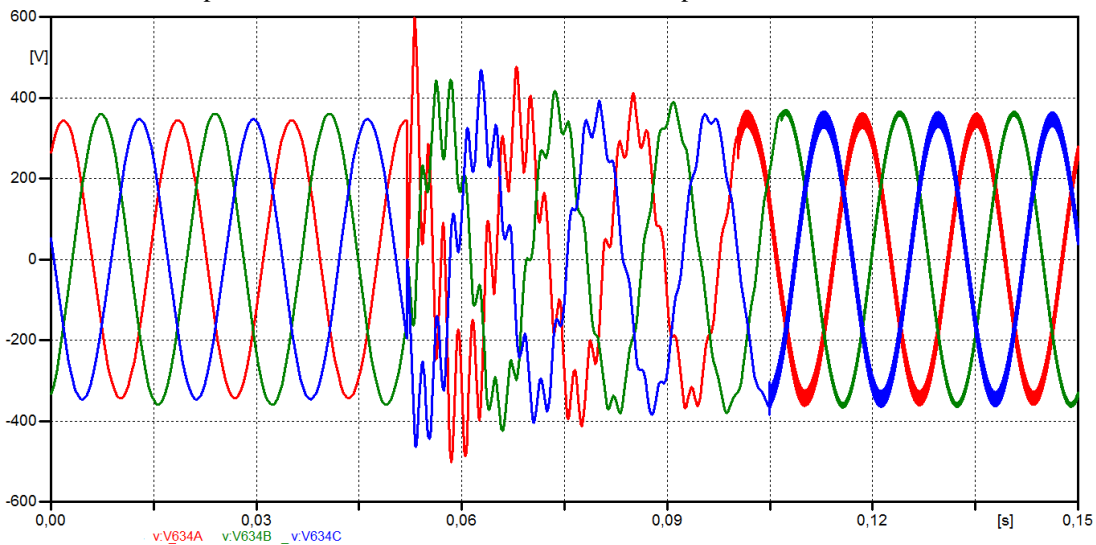
Nas Figuras 50 e 51, pode ser observado o perfil das ondas das tensões resultantes da energização e desconexão do banco instalado no barramento do consumidor, estando os capacitores da subestação fixos.

Figura 50: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

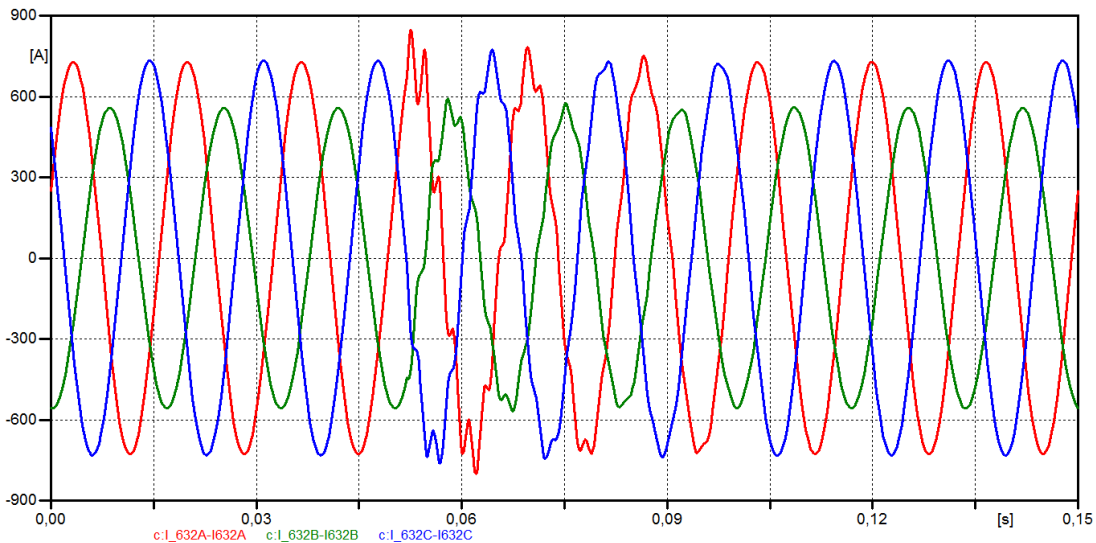
Figura 51: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

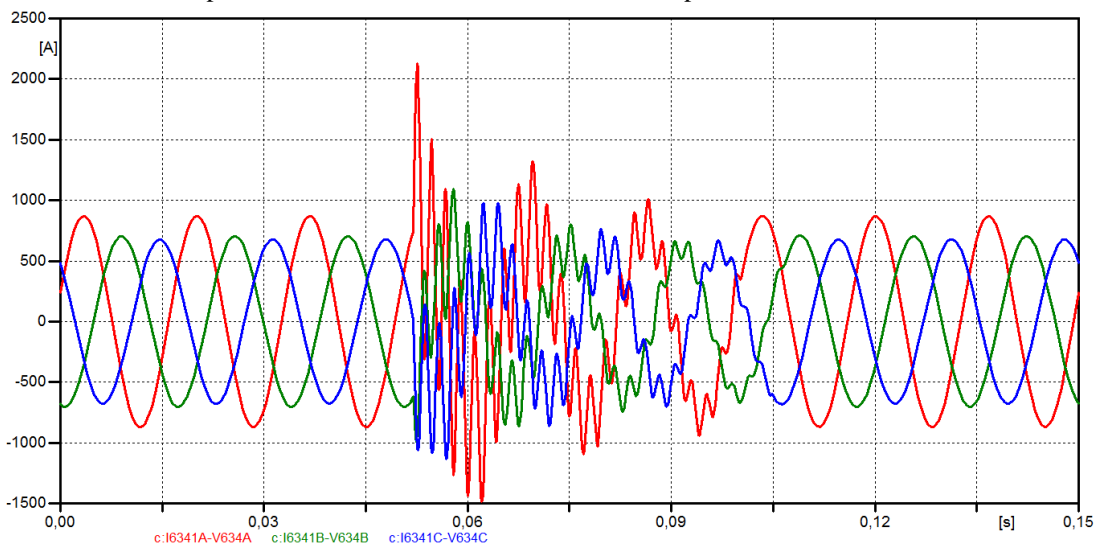
No que concerne as correntes e sobrecorrentes transitórias que percorrem as barras 632 e 634, as mesmas são mostradas nas Figuras 52 e 53, respectivamente.

Figura 52: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 53: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão do banco de capacitores do consumidor, considerando os capacitores da distribuidora fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

A partir dos resultados obtidos, nota-se novamente que a influência da energização e desconexão do banco de capacitores da carga é mais sentida nas fases A de cada barramento. Além disso, apesar do barramento do consumidor sofrer as maiores tensão e corrente transitórios, essas magnitudes são menores do que as simuladas no caso 2. Isto se deve pelo fato do banco a ser energizado, neste caso, estar instalado num nível menor de tensão e, conseqüentemente, possuir uma menor

carga inicialmente armazenada. Sendo assim, a influência do evento transitório devido ao chaveamento em *back-to-back* é amenizada.

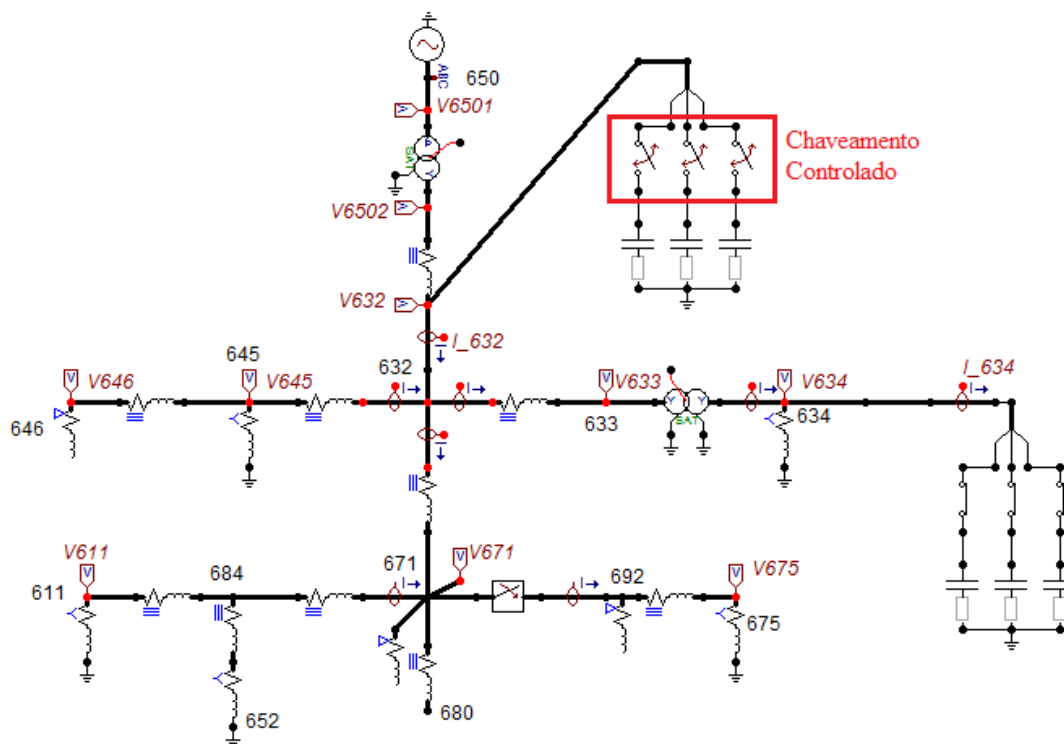
Ainda, nota-se o surgimento de distorções harmônicas de alta frequência nas tensões da barra 634, assim como visto no caso 3.

4.2.5 Análise das Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias – Método de Chaveamento Controlado (Sincronizado)

Com o intuito de mitigar os distúrbios presentes nas formas de onda dos sinais de tensão e corrente pode-se utilizar o método de chaveamento controlado. Nesse método, o fechamento das fases do dispositivo de manobra é sincronizado de maneira que a chave seja acionada no momento em que o sinal de cada fase esteja excursionando por zero. Desta forma, obtém-se uma suavização das magnitudes das sobretensões e sobrecorrentes transitórias, além da redução das distorções harmônicas provocadas pela manobra dos bancos de capacitores.

O circuito simulado para este caso é o mesmo que o proposto para o caso 2 (Figura 39). Isto ocorre, uma vez que é nesta condição de chaveamento que são encontradas as maiores variações nos sinais de tensão e corrente, chegando a valores na ordem de $2,729 pu$ e $3,822 pu$, respectivamente. A Figura 54 apresenta o sistema de distribuição estudado.

Figura 54: Circuito simulado para a utilização do método de chaveamento controlado – conexão e desconexão controlada dos capacitores na barra 632 com a existência do banco fixo no barramento 634



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

No que diz respeito aos tempos de atuação das chaves de cada fase do banco de capacitores da distribuidora (barra 632), foram utilizados os seguintes parâmetros:

- **Fase A:**
 $T_{cl} = 0.05858 \text{ s}$ (que corresponde ao instante em que a onda de tensão da fase A passa por zero) e $T_{op} = 0.10 \text{ s}$;
- **Fase B:**
 $T_{cl} = 0.05298 \text{ s}$ (que corresponde ao instante em que a onda de tensão da fase B passa por zero) e $T_{op} = 0.10 \text{ s}$;
- **Fase C:**
 $T_{cl} = 0.04747 \text{ s}$ (que corresponde ao instante em que a onda de tensão da fase C passa por zero) e $T_{op} = 0.10 \text{ s}$.

Além disso, considera-se que o banco instalado no barramento do consumidor está fixo no sistema ($T_{cl} = -1 \text{ s}$ e $T_{op} = 1 \text{ s}$).

Os Quadros 24 e 25 apresentam os valores das tensões nas barras 632 e 634 antes e após o chaveamento sincronizado do banco da distribuidora.

Quadro 24: Tensões nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (V)	Tempo (s)
632	3040,6	0,0433	3150,7	0,0488	3031,65	0,046
634	338,65	0,0351	355,91	0,0488	341,49	0,0462

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 25: Sobretensões transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

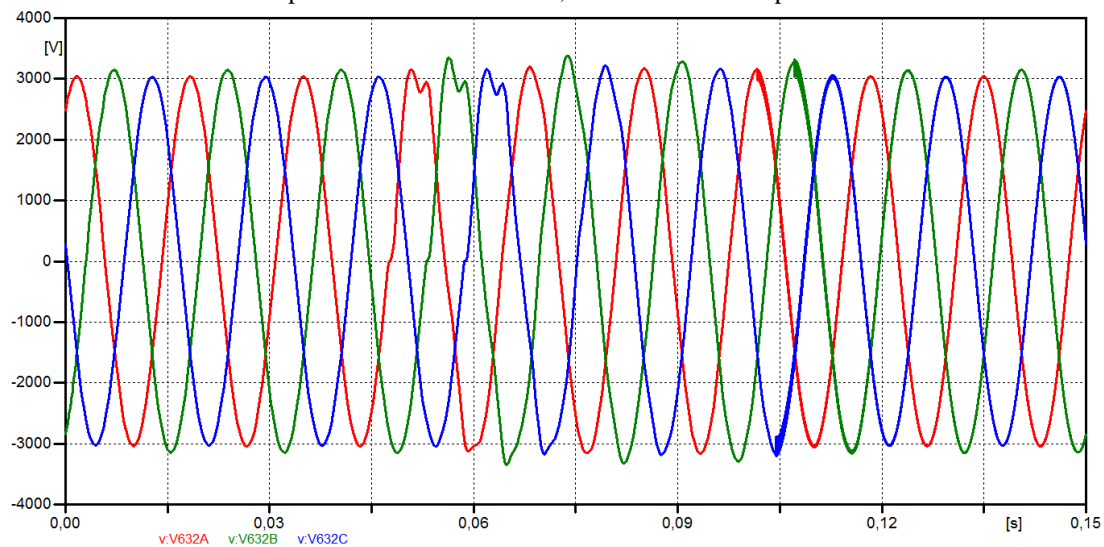
Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)	V_{pico} (V)	Tempo (s)	V_{pico} (pu)
632	3198,8	0,0682	1,052	3380,2	0,0737	1,073	3216,7	0,0793	1,061
634	403,45	0,0502	1,191	435,47	0,0557	1,224	417,5	0,0614	1,223

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A partir dos valores por unidades obtidos na simulação, nota-se que a ação coordenada da manobra do banco da distribuidora provoca uma redução de 30,74% no valor de sobretensão da fase A da barra 632 (em comparação aos valores encontrados no caso 2). Além disso, a redução obtida na fase A da barra 634 foi de 56,36%.

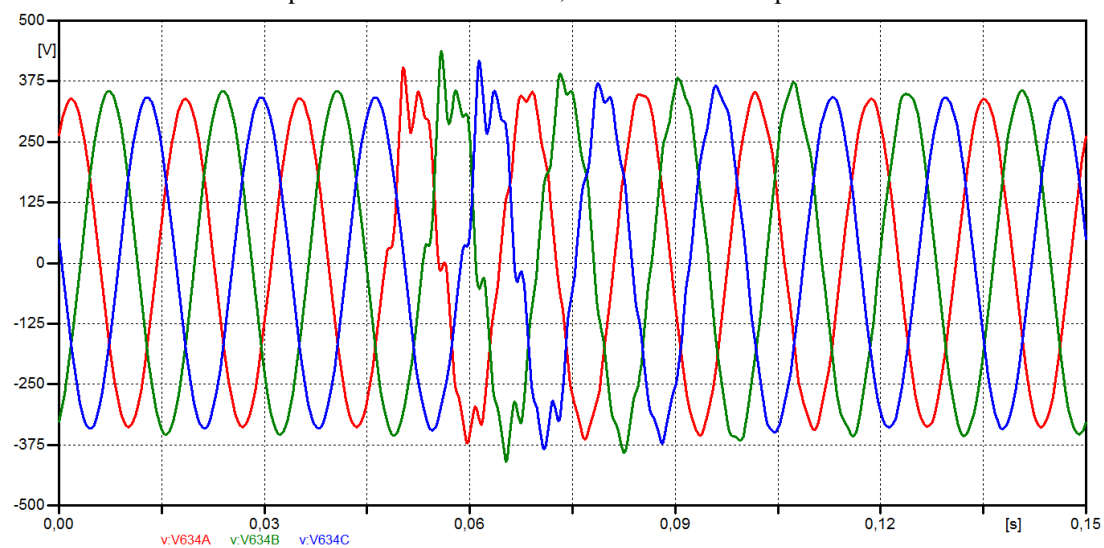
As Figuras 55 e 56 apresentam as formas de onda das tensões obtidas nas barras da distribuidora e do consumidor, respectivamente, considerando a aplicação do chaveamento controlado nos polos do disjuntor.

Figura 55: Simulação das tensões nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 56: Simulação das tensões nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

No que diz respeito ao comportamento das correntes no sistema estudado, os Quadros 26 e 27 apresentam os valores antes e após o chaveamento controlado do banco da subestação. Ainda, as formas das ondas das correntes nas barras 632 e 634 podem ser observadas nas Figuras 57 e 58, respectivamente.

Quadro 26: Correntes nominais nas barras 632 e 634 antes da manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PRÉ-CHAVEAMENTO					
	Fase A		Fase B		Fase C	
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (A)	Tempo (s)
632	691,83	0,0365	527,36	0,0418	695,1	0,0476
634	753,54	0,0361	583,45	0,0331	562,27	0,0471

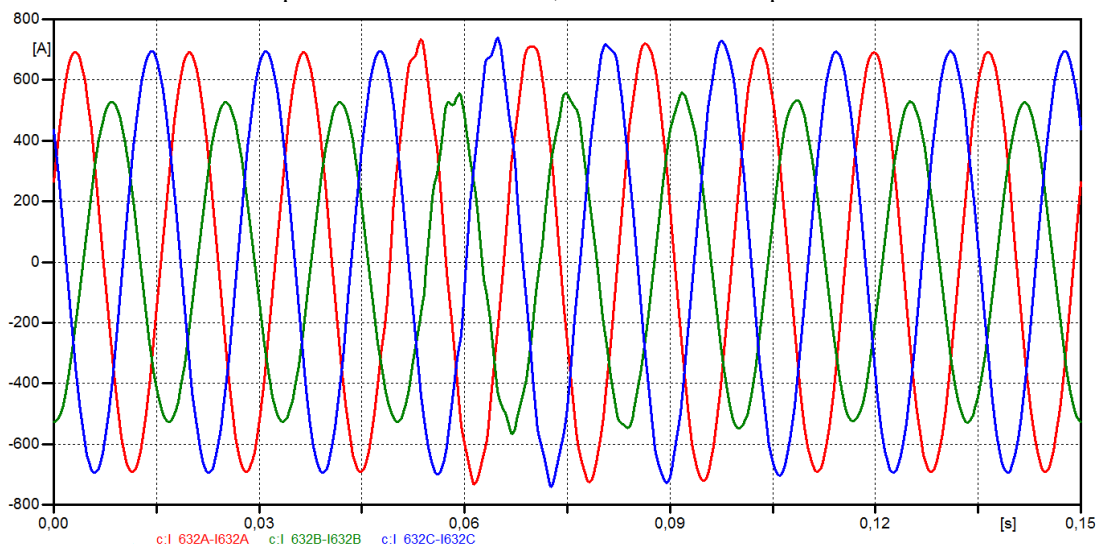
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 27: Sobrecorrentes transitórias nas barras 632 e 634 após a manobra controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.

Barra	PÓS-CHAVEAMENTO								
	Fase A			Fase B			Fase C		
	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)	I_{pico} (A)	Tempo (s)	I_{pico} (pu)
632	733,04	0,0615	1,060	566,47	0,067	1,074	740,94	0,0726	1,066
634	955,75	0,0613	1,268	812,23	0,0671	1,392	785,28	0,0728	1,397

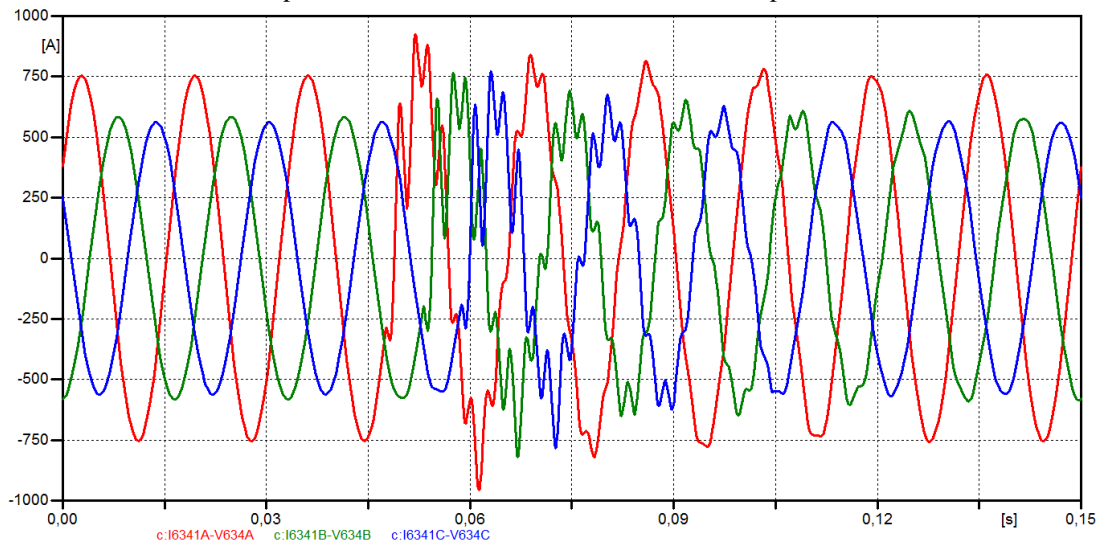
Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Figura 57: Simulação das correntes nas três fases da barra 632 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

Figura 58: Simulação das correntes nas três fases da barra 634 durante a conexão e desconexão controlada do banco de capacitores da distribuidora, considerando os capacitores do consumidor fixos.



Fonte: Desenvolvido pelo autor através do software ATPDraw (2016).

É possível perceber, através dos valores apresentados no Quadro 27, que a sobrecorrente transitória na fase A da barra 632 foi reduzida em 26,74% com relação ao valor correspondente a essa mesma fase no caso 2.

Além disso, no que concerne a sobrecorrente existente na fase A da barra do consumidor, esta apresenta uma redução de 66,82% devido à utilização do método do chaveamento sincronizado.

Ainda, a partir dos resultados obtidos, nota-se que a implementação do método de manobra controlada possibilita a redução das correntes de *inrush* decorrentes do chaveamento em *back-to-back*. Assim, além de mitigar os eventos transitórios, este método contribui para a melhora da qualidade de energia fornecida no sistema e auxilia na diminuição do desgaste elétrico do equipamento de manobra (FRONTIN *et al.*, 2013).

4.3 ANÁLISE COMPARATIVA DOS CASOS ESTUDOS

Nesta seção, com o intuito de facilitar a compreensão dos resultados expostos no presente trabalho, realizar-se-á uma comparação entre as tensões e correntes transitórias obtidas nos casos estudados. Para isto, serão apresentados, através de quadros comparativos, os valores correspondentes as sobretensões e sobrecorrentes para cada fase em separado. Ainda, retomar-se-á, brevemente, a análise efetuada na seção anterior como forma de melhor elucidar o objetivo de pesquisa proposto.

4.3.1 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase A

Nos Quadros 28 e 29, respectivamente, estão representadas as comparações dos valores das tensões e correntes transitórias referentes à fase A. Esta fase, nas simulações realizadas, foi a que apresentou as maiores magnitudes dos distúrbios transitórios. Isto se deve pelo fato da chave ter sido fechada no instante em que as ondas de tensão e corrente da fase A excursionavam pelos seus valores máximos. Desta forma, a energia, presente no circuito neste instante, fica retida no capacitor durante a sua energização.

Quadro 28: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase A para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ- CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		V_{pico} (V)	V_{pico} (V)	V_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	3027,50	-	-
	634	330,27	-	-
1	632	3027,10	5095,70	1,683
	634	330,27	546,13	1,654
2	632	3040,60	4618,30	1,519
	634	338,73	924,30	2,729
3	632	3027,50	3301,10	1,090
	634	330,27	600,94	1,820
4	632	3152,70	3499,80	1,110
	634	343,94	595,24	1,731
Método de Chaveamento Controlado	632	3040,60	3198,80	1,052
	634	338,65	403,45	1,191

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 29: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase A para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ- CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		I_{pico} (A)	I_{pico} (A)	I_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	699,22	-	-
	634	835,08	-	-
1	632	699,28	906,72	1,297
	634	835,01	1048,60	1,256
2	632	691,83	1001,40	1,447
	634	753,54	2879,70	3,822
3	632	699,22	795,05	1,137
	634	835,01	1953,10	2,339
4	632	728,15	846,78	1,163
	634	869,61	2128,00	2,447
Método de Chaveamento Controlado	632	691,83	733,04	1,060
	634	753,54	955,75	1,268

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

A partir dos dados apresentados nos Quadros 28 e 29, é possível perceber que as maiores sobretensões e sobrecorrentes são originadas pela manobra de bancos de capacitores em contraposição (principalmente, no caso 2). Além disso, a influência destes transitórios é mais sentida no barramento do consumidor (barra 634). Isto ocorre, uma vez que os surtos de tensão são transferidos, através dos transformadores, para as redes com menores níveis de tensão (GREENWOOD, 1991).

Ademais, no que dizem respeito às sobretensões, estas apresentaram maiores valores para os casos em que o banco a ser manobrado estava localizado na subestação de distribuição (casos 1 e 2). Isto é uma consequência do nível de tensão, ao qual o banco (a ser chaveado) está conectado, ser mais elevado do que o dos casos 3 e 4.

Ao se analisar os resultados obtidos através da aplicação do método de manobra controlada (em comparação com o caso 2) ficam evidentes as reduções dos efeitos transitórios no sistema. No que concerne à tensão transitória encontrada na barra 634 (pior caso), esta apresentou uma redução na ordem de 56,36 %. Já a sobrecorrente, presente no mesmo barramento, foi mitigada em 66,82 %.

4.3.2 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase B

A seguir, os Quadros 30 e 31 expõem os valores obtidos para as sobretensões e sobrecorrentes transitórias referentes à fase B, respectivamente.

Quadro 30: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase B para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ-CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		V_{pico} (V)	V_{pico} (V)	V_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	3130,20	-	-
	634	345,28	-	-
1	632	3130,40	3697,80	1,181
	634	345,29	409,10	1,185
2	632	3145,10	3489,20	1,109
	634	354,31	545,07	1,538
3	632	3130,10	3328,00	1,063
	634	345,29	466,39	1,351
4	632	3265,20	3369,20	1,032
	634	360,14	442,99	1,230
Método de Chaveamento Controlado	632	3150,70	3380,20	1,073
	634	355,91	435,47	1,224

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 31: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase B para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ- CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		I_{pico} (A)	I_{pico} (A)	I_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	535,13	-	-
	634	674,22	-	-
1	632	535,10	584,45	1,092
	634	674,38	746,64	1,107
2	632	527,36	627,52	1,190
	634	583,45	1250,80	2,067
3	632	535,13	557,67	1,042
	634	674,38	931,49	1,381
4	632	557,95	591,52	1,060
	634	703,38	1095,20	1,557
Método de Chaveamento Controlado	632	527,36	566,47	1,074
	634	583,45	812,23	1,392

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Novamente, verifica-se que as maiores sobretensões e sobrecorrentes ocorrem durante a conexão e desconexão do banco de capacitores da distribuidora, considerando o banco do consumidor fixo (caso 2). Isto ainda é mais evidente com relação às correntes transitórias, uma vez que a manobra de bancos em *back-to-back* provoca a elevação das magnitudes destes distúrbios (FRONTIN *et al.*, 2013).

Ainda, é possível perceber que a técnica de chaveamento sincronizado promoveu a diminuição dos eventos transitórios existentes na condição de manobra mencionada acima. Sendo assim visualizou-se uma redução de 20,42 % na sobretensão e de 32,66 % na sobrecorrente presentes na fase B da barra 634.

4.3.3 Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias Referentes à Fase C

Os Quadros 32 e 33 apresentam, respectivamente, os dados obtidos das tensões e correntes transitórias obtidas na fase C do sistema de distribuição simulado.

Quadro 32: Comparações das tensões e sobretensões existentes na fase C para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ-CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		V_{pico} (V)	V_{pico} (V)	V_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	3018,00	-	-
	634	332,84	-	-
1	632	3017,90	4719,10	1,564
	634	332,75	506,15	1,521
2	632	3031,30	4167,50	1,375
	634	341,31	807,02	2,364
3	632	3017,90	3180,00	1,054
	634	332,84	495,59	1,489
4	632	3142,20	3594,50	1,144
	634	346,59	466,67	1,346
Método de Chaveamento Controlado	632	3031,65	3216,70	1,061
	634	341,49	417,50	1,223

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

Quadro 33: Comparações das correntes e sobrecorrentes existentes na fase C para os casos estudados.

CASO	BARRA	PRÉ- CHAVEAMENTO	PÓS-CHAVEAMENTO	
		I_{pico} (A)	I_{pico} (A)	I_{pico} (pu)
Sem Bancos de Capacitores Conectados	632	703,37	-	-
	634	650,14	-	-
1	632	703,54	729,85	1,037
	634	650,16	685,26	1,054
2	632	694,76	841,51	1,211
	634	562,35	1927,30	3,427
3	632	703,38	736,65	1,047
	634	650,16	1163,50	1,790
4	632	732,67	774,47	1,057
	634	676,94	1134,20	1,675
Método de Chaveamento Controlado	632	695,10	740,94	1,066
	634	562,27	785,28	1,397

Fonte: Desenvolvido pelo autor.

É possível perceber, mais uma vez, que os distúrbios transitórios mais elevados ocorrem no barramento do consumidor (barra 634), principalmente, no que concerne ao chaveamento de bancos em contraposição. Além disso, nota-se que a condição de manobra de um banco único de capacitores acarreta sobretensões elevadas no sistema, conforme descrito por D’Ajuz (1985). Isto pode ser observado nos valores das tensões apresentados, para o caso 1, no Quadro 32.

No que diz respeito à mitigação das tensões e correntes transitórias, é comprovada, outra vez, a eficácia da utilização de dispositivos de chaveamento controlado. As reduções, apresentadas para a fase C, referentes às sobretensões e sobrecorrentes no barramento da carga (barra 634) são: 48,26 % e 59,23 %, respectivamente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho procurou-se explorar os arranjos de manobras de bancos de capacitores comumente utilizados num sistema de distribuição e como estas operações podem provocar elevadas tensões e correntes transitórias no circuito. Ainda, buscou-se investigar a efetividade do método de chaveamento controlado como forma de mitigar estes transitórios.

Uma das dificuldades impostas no estudo de transitórios eletromagnéticos é a modelagem matemática de circuitos que possibilitem representar de forma mais fiel possível um sistema real. Nesta análise, com o intuito de se obter simplificações, durante o equacionamento dos eventos transitório, optou-se por desconsiderar os amortecimentos nas respostas dos circuitos RL, RLC e LC estudados. Esta simplificação, entretanto, não prejudicou de forma significativa os resultados obtidos, uma vez que se procurou analisar o comportamento do sistema, considerando sempre o pior caso existente. Desta forma, durante toda essa monografia, foi estimado que o banco fosse chaveado no exato momento em que as ondas de tensão e corrente excursionavam pelos seus valores máximos.

Além disso, durante as simulações de manobras de bancos únicos de capacitores e manobras de bancos em contraposição foi possível verificar que a magnitude dos transitórios se manteve na ordem de $2,00 pu$ e $4,00 pu$, respectivamente. Estes valores são similares aos obtidos de forma analítica (no capítulo 3) e correspondem com os descritos na literatura utilizada. Sendo assim, fica evidente que, entre os dois tipos de chaveamento analisados, a manobra de bancos em *back-to-back* é a que apresenta as sobretensões e sobrecorrentes de maior intensidade.

É importante ressaltar, também, que as sobretensões e sobrecorrentes transitórias encontradas, a partir das simulações, foram mais intensas no barramento da carga (consumidor) do que no da subestação. Em um primeiro momento, imaginava-se que estes valores seriam menores devido à queda de tensão que ocorre no circuito, conforme a distância em relação à fonte de alimentação aumenta. Contudo, conforme descrito por Greenwood (1991), ocorre, nestes casos, a transferência (através dos transformadores) dos surtos de tensão para as redes de menores níveis de tensão.

Por último, conseguiu-se comprovar a eficiência do método de chaveamento sincronizado como forma de mitigar os distúrbios transitórios. Para isto, verificaram-se reduções significativas nas sobretensões e sobrecorrentes correspondentes a pior condição de manobra simulada. No que concerne às reduções nos valores de tensão transitória, estas foram na ordem de 60 %, para o pior caso. Já no que diz respeito às correntes, a redução obtida ficou próxima a 70 %.

5.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Diante da abrangência de assuntos relacionados ao tema deste trabalho, além das curiosidades geradas por ele e da não abordagem de alguns assuntos durante o seu desenvolvimento, sugere-se como estudos futuros:

- Analisar a influência das distorções harmônicas decorrentes da instalação de bancos de capacitores nos sistemas de distribuição;
- Analisar os critérios de alocação de bancos de capacitores em sistemas de potência;
- Desenvolver um estudo referente à aplicação dos diferentes arranjos de proteção (através da utilização de relés digitais) de bancos de capacitores;
- Analisar os efeitos das faltas próximas aos bancos de capacitores;
- Analisar e comparar, através de um estudo de caso, resultados encontrados a partir de um sistema modelado (contemplando chaveamentos capacitivos) com os valores obtidos em um sistema real.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, A. E. A.; NEVES, W. L. A. **Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Energia**. Belo Horizonte: UFMG, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5282: Capacitores de Potência em Derivação para Sistemas de Tensão Nominal acima de 1000 V – Especificação**. Rio de Janeiro, 1998.
- BARROS, A. A. **Análise de Sobretensões e Sobrecorrentes Transitórias na Energização de Bancos de Capacitores**. Projeto de Diplomação (UFRJ), 2015.
- CARVALHO, A. C. C.; DA SILVA, L. P. S.; DRUMMOND, M. A. G.; LACORTE, M.; PORTELA, C. M.; CARVALHO, F. M. S.; AMON FILHO, J. e outros. **Disjuntores e Chaves: Aplicação em Sistemas de Potência**. Rio de Janeiro: EDUFF/ FURNAS, 1995. p. 108-146 (cap. 4) e 180-212 (cap. 6).
- CICHANOWSKI, S. W.; NEWCOMB, G. R. **Power Capacitors**. *Proceedings of the 20th Electrical Electronics Insulation Conference*. Boston, 1991. p. 162-165.
- D’AJUZ, A. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada**. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985. p. 224-241 (cap. XI).
- D’AJUZ, A. **Transitórios Elétricos e Coordenação de Isolamento: Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão**. Rio de Janeiro: FURNAS, 1987. p. 370-383 (cap. 18).
- DAS, J. C. **Transients in Electrical Systems: Analysis, Recognition and Mitigation**. New York: McGraw-Hill, 2010. p. 123-153 (cap. 6).
- DE MOURA, D. F. P.; NEVES, W. L. A.; DANTAS, K. M. C.; JÚNIOR, D. F. **Estudo de Surtos Decorrentes de Manobras em Bancos de Capacitores: Procedimentos Computacionais e Medidas Mitigadoras**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. Goiânia: 2012.
- DOS SANTOS, H. L. **Influência das Distorções Harmônicas na Proteção de Bancos de Capacitores**. Belo Horizonte: Tese de Mestrado (PPGEE), UFMG, 2010.
- FRONTIN, S. O.; D’AJUZ, A.; CAMPOS, R. C.; SCHWARZ, M. B.; MORAIS, S. A. e outros. **Equipamentos Elétricos de Alta Tensão: Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas**. Brasília: TAESA, 2013. p. 551-578 (cap. 12) e 632-676 (cap. 13).
- GODOI, A. A. **Alocação de Bancos de Capacitores em redes Primária e Secundária de Energia Elétrica**. Curitiba: Tese de Mestrado (PPGEE), UFPR, 2009.
- GONËN, T. **Electric Power Distribution System Engineering**. New York: McGraw-Hill, 1986. p. 371-439 (cap. 8).

GREENWOOD, A. **Electrical Transients in Power Systems**. New York: John Wiley & Sons, 1991. p. 1-9 (cap. 1), 37-61 (cap. 3), 62-91 (cap. 4), 92-124 (cap. 5) e 126-149 (cap. 6).

IIZARRY-SILVESTRINI, M. F.; VÉLEZ-SEPÚLVEDA, T. E. **Mitigation of Back-to-Back Capacitor Switching Transients on Distribution Circuits**. San Juan: PREPA, 2006. p. 1-8.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **IEEE Std. 18-2002: Standard for Shunt Power Capacitors**. New York, 2002.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **IEEE 13 Buses Test Feeder**. *IEEE Power Engineering Society: Distribution System Analysis Subcommittee*. New York, 2004.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS. **IEEE C37.012-2005: Application Guide for Capacitance Current Switching for AC High-Voltage Circuit Breaker**. New York, 2005.

JOHNSON, A. A. **Electrical Transmission and Distribution Reference Book**. Pennsylvania: Westinghouse Electric Corporation, 1964. p. 233-264 (cap. 8).

MELIOPOULOS, A. P. S. **Power System Grounding and Transients**. New York: Marcel Dekker Inc., 1988. p. 339-427 (cap. 9).

NATARAJAN, R. **Power System Capacitors**. Boca Raton: CRC Press, 2005. p. 61-84 (cap. 5), 97-122 (cap. 7) e 125-139 (cap. 8).

NATIONAL ELECTRICAL MANUFACTURERS ASSOCIATION. **NEMA Standards Publication CP 1-2000: Shunt Capacitors**. Rosslyn, 2000.

O'LEARY, R. P.; HARNER, R. H. **Evaluation of Methods for Controlling the Overvoltages Produced by the Energization of Shunt Capacitor Bank**. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*. Paris: CIGRÉ, 1988.

OLIVEIRA, A. L. P.; PEREIRA, A. L. M. **Introduction of the Mechanically Switched Capacitors (MSCs) Application on Power Transmission Systems**. *2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*. São Paulo, 2010. p. 452-457.

PAMPLONA, F. M. P.; FERNANDES JÚNIOR, D.; SOUZA, B. A.; NEVES, W. L. A. **Sobretensões Transitórias de Correntes de Manobras de Bancos de Capacitores**. Campina Grande: UFPB, 1998.

POMALIS, M.; LEBORGNE, R. C. **Notas de Aula da Disciplina de Qualidade de Energia Elétrica (ENG10014): Tutorial ATP Draw**. Aulas 1 e 3. Porto Alegre: UFRGS, 2016.

SCOTT, R. E. **Linear Circuits**. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1960. p. 288-311 (cap. 9), 348-368 (cap. 11) e 383-408 (cap. 12).

SHENKMAN, A. L. **Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook**. Dordrecht: Springer, 2005. p. 1-48 (cap. 1), 49-154 (cap. 2), 155-212 (cap. 3) e 319-464 (cap. 6).

SMEETS, R.; VAN DER SLUIS, L.; KAPETANOVIC, M.; PEELO, D.; JANSSEN, A. **Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems**. Londres: John Wiley & Sons, 2014. p. 96-138 (cap. 4), 141-162 (cap. 5) e 310-344 (cap. 11).

SUWANASRI, T.; WATTANAWONGPITAK, S.; SUWANASRI, C. **Multi-Step Back-to-Back Capacitor Bank Switching in a 115kV Substation**. Bangkok, 2009.

TZIOUVARAS, D. A.; DHILLON, M. S. **Proteção de Bancos de Capacitores Sem Fusíveis Usando Relés Digitais**. Pullman: Schwitzer Engineering Laboratories, 1999.

ZANETTA JÚNIOR, L. C. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: EDUSP, 2003. p. 485-524 (cap. 13).