

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

TADEU MONTEIRO DA SILVA FILHO

**A TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA APLICADA NA AVALIAÇÃO
ESPECTRAL PARA CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES EM
SISTEMA DE TRANSMISSÃO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

TADEU MONTEIRO DA SILVA FILHO

**A TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA APLICADA NA AVALIAÇÃO
ESPECTRAL PARA CHAVEAMENTO DE BANCO DE CAPACITORES EM
SISTEMA DE TRANSMISSÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina TCC2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Industrial Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Tadeu Monteiro Da Silva Filho

A transformada de fourier janelada aplicada na avaliação espectral para chaveamento de banco de capacitores em sistema de transmissão

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 13:50hs do dia 12/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Industrial Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Bruno Catarino Bispo - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico este trabalho aos meus pais que com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus.

Em seguida agradeço aos meus pais e a minha irmã, que estiveram sempre presentes me apoiando e me dando forças desde o início até essa etapa final da graduação.

Muito obrigado também a minha namorada que compartilhou comigo este momento, foi paciente em minhas ausências e ajudou bastante, dando dicas e apoio para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Silvio Aparecido de Souza, pela sabedoria com que me guiou nesta trajetória, dando todo o suporte necessário para a conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos e colegas da universidade que sempre torceram por mim e me apoiaram no decorrer da graduação.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

“Quem acredita sempre alcança”

Renato Russo

RESUMO

DA SILVA FILHO, Tadeu Monteiro. **A transformada de Fourier janelada aplicada na avaliação espectral para chaveamento de banco de capacitores em sistema de transmissão**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

A utilização de bancos de capacitores em derivação é uma metodologia efetiva para aumentar os níveis de tensão, a fim de atender a demanda de energia solicitada pelo sistema elétrico de potência. Os reativos presentes no sistema são compensados através da inserção de potência capacitiva por parte dos bancos de capacitores. Porém, no momento em que um banco de capacitores é chaveado, em operação, ocorrem elevadas magnitudes de sobretensões e sobrecorrentes transitórias. Essas tensões e correntes podem causar problemas no funcionamento nos equipamentos instalados próximos ao banco. Por isso, é necessário um estudo para a compreensão do comportamento desses transitórios ocasionados pela energização de bancos de capacitores. Neste trabalho são realizadas simulações de um sistema elétrico de potência real e suas principais condições de manobra de banco de capacitores, utilizando o software ATP (*Alternative Transients Program*). Em seguida utilizando-se do software Matlab, os sinais resultantes são submetidos a uma avaliação de suas energias através da Transformada de Fourier Janelada, a qual fornecerá as informações no domínio do tempo e da frequência dos sinais analisados, possibilitando a caracterização do transitório em estudo. De acordo com os resultados encontrados foi possível visualizar uma faixa de frequência característica do chaveamento de banco de capacitores em sistemas elétricos de potência, e suas respectivas alterações diante de diferentes tipos de chaveamentos.

Palavras-chave: Banco de capacitores em derivação. Chaveamento. Transitórios Sobretensões. Sobrecorrentes. ATP. Matlab. Avaliação espectral.

ABSTRACT

DA SILVA, Tadeu Monteiro F. **The windowed Fourier transform applied in the spectral evaluation for bank switching of capacitors in transmission system** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

The use of shunt capacitor banks is an effective methodology to increase voltage levels in order to meet the demand for power request by the electric power system. The reactives present in the system are compensated through the insertion of capacitive power by the banks. However, at the moment a capacitor bank is switched in operation, high magnitudes of overvoltages and transient overcurrents occur. These voltages and currents can cause malfunctions in the equipment installed near the bank. Therefore, a study is necessary to understand the behavior of these transients caused by the energization of capacitor banks. In this work, simulations are performed of an actual power system and its main capacitor bank maneuver conditions, using the ATP (Alternative Transients Program) software. Then using the Matlab software, the resulting signals are subjected to an evaluation of their energies through the Windowed Fourier Transform, which will provide information on the time and frequency of the analyzed signals. According to the results found in this paper, it was possible to visualize a frequency band characteristic of capacitor bank switching in electrical power systems, and their respective alterations to different types of switches.

Keywords: Shunt capacitors bank. Switched. Transients. Overvoltage. Overcurrent. ATP. Matlab. Spectral evaluation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquemático do fluxo de energia elétrica nas divisões do sistema.....	10
Figura 2 – Sistema de Transmissão	11
Figura 3 – Banco de Capacitores em derivação.....	16
Figura 4 – Aspectos construtivos e componentes de uma unidade capacitiva	17
Figura 5 – Janelamento do sinal	24
Figura 6 – Janela de Hanning	26
Figura 7 – Resposta em frequência	26
Figura 8 – Sistema Elétrico de Potência estudado.....	28
Figura 9 – Sinal senoidal sem transitório	31
Figura 10 – Espectrograma do sinal sem transitório	32
Figura 11 – Harmônica do sinal sem transitório	33
Figura 12 – Sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.	34
Figura 13 – Espectrograma do sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.....	34
Figura 14 – Harmônicos do sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.....	35
Figura 15 – Sinal trifásico das tensões do caso base	38
Figura 16 – Sinal trifásico das tensões do caso 1	39
Figura 17 – Zoom Sinal trifásico das tensões do caso 1	40
Figura 18 – Espectrograma resultante do caso 1.....	41
Figura 19 – Harmônicos da Janela 6 do sinal em análise.	42
Figura 20 – Corrente do BC1 para o caso 1.....	43
Figura 21 – Sinal trifásico das tensões do caso 2	44
Figura 22 – Zoom Sinal trifásico das tensões do caso 2	44
Figura 23 – Espectrograma resultante do caso 2.....	45
Figura 24 – Harmônicos da Janela 9 do sinal em análise.	46
Figura 25 – Corrente do BC1 para o caso 2.....	47
Figura 26 – Sinal trifásico das tensões do caso 3	48
Figura 27 – Zoom Sinal trifásico das tensões do caso 3	48
Figura 28 – Espectrograma resultante do caso 3.....	50
Figura 29 – Harmônicos da Janela 6 do sinal em análise.	51
Figura 30 – Corrente do BC1 para o caso 3.....	51

Figura 31 – Corrente do BC2 para o caso 3.....	52
Figura 32 – Sinal trifásico das tensões do caso 4.	53
Figura 33 – Zoom Sinal trifásico das tensões do caso 4.	53
Figura 34 – Espectrograma do sinal resultante do caso 4	55
Figura 35 – Harmônicos da Janela 9 do sinal em análise	56
Figura 36 – Corrente do BC1 para o caso 4.....	56
Figura 37 – Corrente do BC2 para o caso 4.....	57

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Sobretensões admissíveis à frequência industrial.....	19
Quadro 2 – Sobrecorrentes admissíveis em unidades capacitivas	20
Quadro 3 – Dados das barras do sistema simulado	29
Quadro 4 – Dados das cargas do sistema simulado	29
Quadro 5 – Dados das linhas do sistema simulado	29
Quadro 6 – Tensões no barramento de 88 kV, caso base	38
Quadro 7 – Tensões no barramento de 88 kV, caso 1	40
Quadro 8 – Correntes com banco de capacitor BC1 chaveado a 0°, caso 1.....	43
Quadro 9 – Tensões no barramento de 88kV, caso 2	45
Quadro 10 – Correntes com banco de capacitor BC1 chaveado a 90°, caso 2.....	47
Quadro 11 – Tensões no barramento de 88kV, caso 3.....	49
Quadro 12 – Correntes com banco de capacitor BC2 chaveado a 0°, o caso 3	52
Quadro 13 – Tensões no barramento de 88 kV, caso 4.....	54
Quadro 14 – Correntes com banco de capacitor BC2 chaveado a 90°, caso 4	57

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	10
1.1.1 Problema	12
1.2 OBJETIVOS	13
1.3 Objetivo Geral	13
1.4 Objetivo Específico.....	13
2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS	14
2.1 BANCO DE CAPACITORES	15
2.2 BANCO DE CAPACITORES EM SÉRIE	15
2.3 BANCO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO.....	16
2.3.1 Unidade Capacitiva	16
2.3.2 Capacitância.....	18
2.3.3 Cálculo da Potência de um Capacitor Trifásico.....	18
2.3.4 Sobretensão à Frequências Industriais	19
2.3.5 Sobrecorrentes.....	20
2.4 BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	20
2.4.1 Manobra de Banco de Capacitores	21
3 TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA	23
4 METODOLOGIA APLICADA	27
4.1 SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO	27
4.2 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA.....	30
5 RESULTADOS OBTIDOS	38
5.1 CASO BASE.....	38
5.2 ANÁLISE DO CASO 1	39
5.3 ANÁLISE DO CASO 2.....	47
5.4 ANÁLISE DO CASO 3.....	47
5.5 ANÁLISE DO CASO 4.....	53
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	58
REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

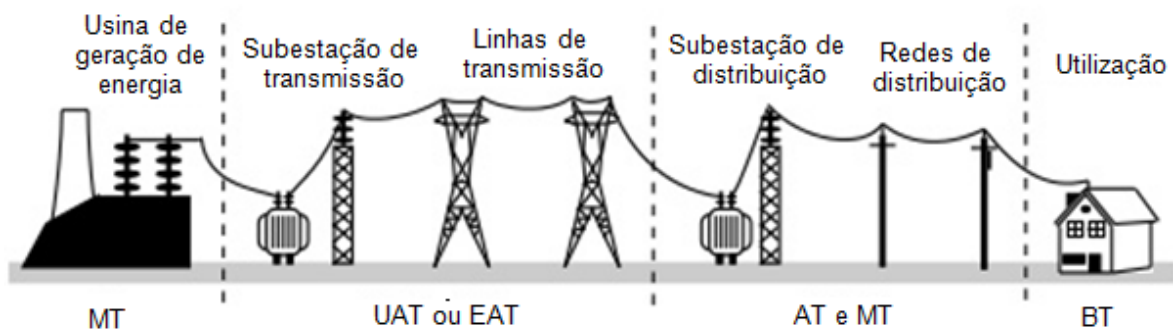
1.1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A crescente demanda de energia elétrica, devido ao desenvolvimento industrial do país, implica no constante crescimento do sistema elétrico, aumentando sua complexidade desde a geração até a distribuição.

Os sistemas elétricos de potência tem a função de fornecer energia elétrica necessária para atender as necessidades dos centros de consumo, cumprindo os requisitos (padrões) de qualidade, confiabilidade e segurança.

Um sistema elétrico de potência (SEP) é dividido em geração, transmissão e distribuição, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Esquemático do fluxo de energia elétrica nas divisões do sistema elétrico.



Fonte: (DINIZ, 2013).

Para atender a demanda dos centros de consumo, a energia elétrica é produzida em usinas geradoras, onde uma fonte de energia primária é transformada em energia elétrica. Na geração uma tensão alternada é produzida, a qual é expressa por uma onda senoidal simétrica. Essa tensão propaga-se pelo sistema elétrico mantendo a frequência, em condições normais de operação, quase constante e modificando a amplitude à medida que trafega pelos transformadores. No Brasil a frequência padrão é de 60 HZ.

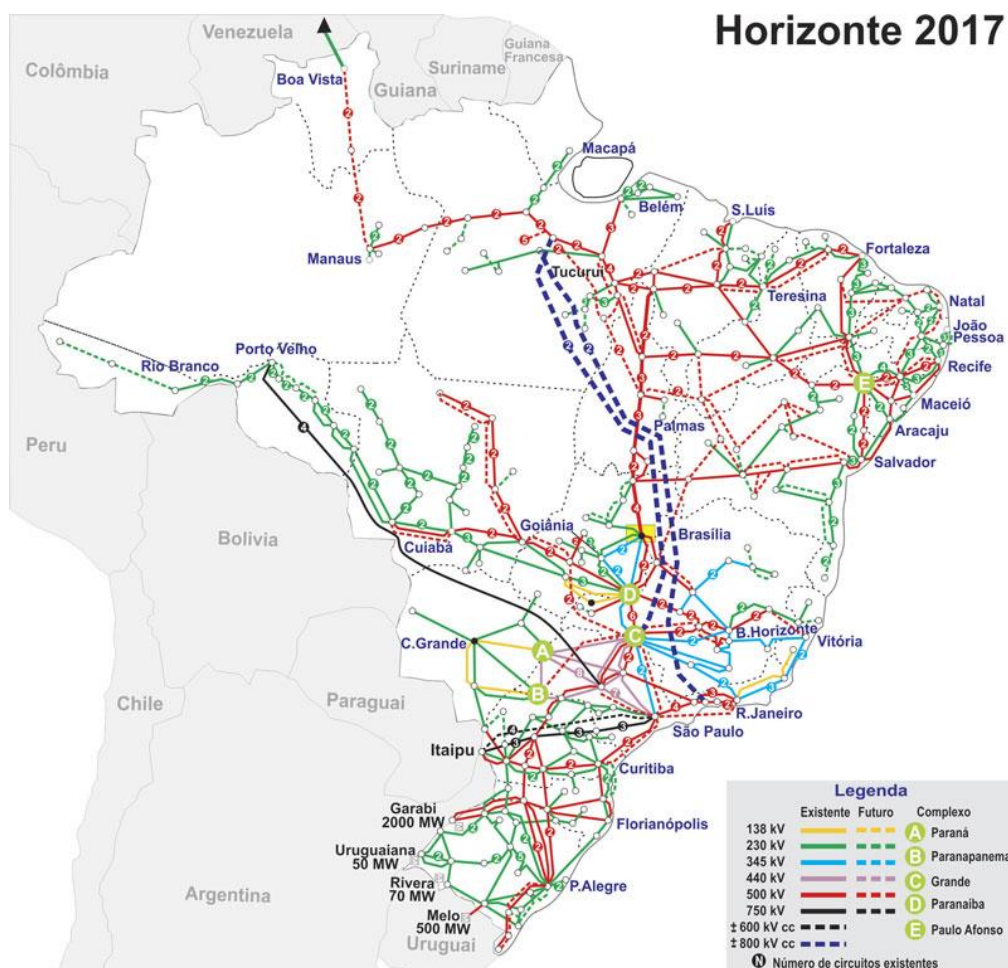
Existem diversas maneiras de geração, sendo as mais comuns as hidroelétricas, térmicas e nucleares, sendo que no Brasil predomina-se as hidroelétricas (CAÑZARES, 2011).

Essas usinas geralmente estão localizadas a uma grande distância dos centros de consumo e, com isso, tem-se a necessidade de transmitir tal energia elétrica produzida até o ponto onde ela será consumida.

Dessa forma, são utilizadas as linhas de transmissão e distribuição, que tem como função a transferência de energia elétrica das unidades geradoras até os consumidores finais. As linhas de transmissão são capazes de transferir enormes quantidades de energia a grandes distâncias, com poucas perdas de energia, operando em alta tensão. Já as linhas de distribuição transferem menores quantidades de energia, a pequenas distâncias, pois as linhas de distribuição estão mais próximas aos centros de cargas (MILLER, 1987).

O setor de transmissão brasileiro pode ser descrito como robusto devido às inúmeras interligações dos sistemas de várias regiões, com aproximadamente 100.000 km de linhas de transmissão, compreendendo subestações e linhas de transmissão em tensões iguais ou superiores a 230 kV (ONS, 2013), definido como rede básica. A Figura 2 está ilustrando o mapa do Sistema Interligado Nacional (SIN):

Figura 2 - Sistema de Transmissão.



Fonte: (ONS, 2017)

Devido ao aumento tanto das interligações quanto da demanda dos sistemas elétricos de potência, a energia elétrica passou a ter que respeitar padrões de qualidade e confiabilidade em seu fornecimento, sendo este regulado e fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Segundo a resolução da ANEEL N° 424/2010, é dever das concessionárias de energia atender seus consumidores com níveis de tensão adequados, sujeitos a multa.

Para garantir as exigências da ANEEL, nos pontos de distribuição, é indispensável à utilização de estratégias que possibilitem a correção do fator de potência, da potência reativa e da tensão, uma vez que a falta de controle destes pode resultar no aumento das perdas elétricas e no comprometimento do perfil de tensão.

Neste contexto, os bancos de capacitores são utilizados para corrigir o perfil de tensão através da inserção de reativos no sistema, elevando a tensão de um dado ponto do SEP. Conseqüentemente, reduz-se a corrente solicitada e perdas de energia (LUCHINI, 2011).

1.1.1 Problema

Um dos eventos mais comuns em sistemas de potência é o chaveamento/manobra de bancos de capacitores para responder as condições de carregamento do sistema. Esses chaveamentos podem causar transitórios significantes sobre os equipamentos do sistema. Os diversos fatores que afetam a intensidade e a duração dos transitórios de tensões e correntes dependem dos tipos de chaveamento, da configuração da rede, da quantidade de banco de capacitores e suas respectivas potências (DANTAS, 2010).

Devido aos seus altos níveis de tensão e correntes, os transitórios causados pelos chaveamentos de banco de capacitores no sistema elétrico podem ocasionar, segundo (DAS, 2010), os seguintes efeitos no sistema:

- Distorções harmônicas das ondas de tensão e corrente, e ressonâncias em conjunto com as cargas geradoras de harmônicas;
- Aumento das correntes de energização (*inrush*) transitórias em transformadores, além de gerar sobretensões;

- Aumento do número de atuações por parte dos equipamentos de manobra, o qual pode ser superior aos valores especificados pelas normas;
- Descarga do banco de capacitores em condições de falta, provocando sobretensões que podem danificar os terminais secundários dos transformadores de corrente;
- Impactar na qualidade de energia fornecida às cargas sensíveis presentes no sistema, como por exemplo, os sistemas de *drives* (inversores), podendo causar o seu desligamento.

Por isso, é importante um estudo sobre chaveamento de banco de capacitores em sistema elétrico de potência com o intuito de determinar os seus respectivos níveis de sobretensões e faixa de frequências características para cada tipo de chaveamento (DANTAS, 2010).

1.2 OBJETIVOS

Este tópico tem o propósito de apresentar o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos que serão alcançados ao longo do estudo.

1.3 Objetivo Geral

O objetivo geral será utilizar a análise espectral para caracterizar os transitórios gerados por chaveamento do banco de capacitores em um sistema elétrico de potência, utilizando-se a Transformada de Fourier Janelada (TFJ).

1.4 Objetivo Específico

Elaborou-se uma relação de objetivos específicos que deverão ser atingidos ao longo deste trabalho, com a finalidade de alcançar o objetivo geral. Estes objetivos são:

- Realizar pesquisa bibliográfica sobre banco de capacitores;
- Realizar pesquisa bibliográfica sobre a Transformada de Fourier Janelada;

- Analisar as consequências do chaveamento dos bancos de capacitores no sistema elétrico;
- Simular e analisar o sistema elétrico de potência em estudo via software ATP;
- Utilizar a Transformada de Fourier Janelada para identificar e caracterizar os transitórios gerados do chaveamento dos bancos de capacitores em função de seus espectros de frequência.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 BANCO DE CAPACITORES

Determinados equipamentos, como transformadores e motores elétricos, necessitam para a sua operação de certa quantidade de potencia reativa. Essa energia reativa pode ser fornecida por várias fontes conectadas ao sistema elétrico, como por exemplo, geradores, compensadores síncronos, linhas de transmissão e banco de capacitores (MAMEDE, 2011).

Entre os elementos mencionados acima, os bancos de capacitores levam vantagem em relação aos outros, visto que tem o menor custo de instalação e maior facilidade de manutenção (D'AJUZ, 1985).

A instalação de fontes alternativas de energia reativa nas proximidades da carga consumidora evita, ao máximo, o transporte de energia reativa dos terminais de geração aos terminais consumidores. Assim, reduzem-se as perdas na transmissão de energia, resultando em um melhor rendimento do sistema elétrico de potência (MAMEDE, 2011).

Quanto à instalação de bancos de capacitores no SEP, estes podem ser instalados de duas maneiras: em série com as linhas ou em paralelo com as cargas (derivação).

2.2 BANCO DE CAPACITORES EM SÉRIE

Os bancos de capacitores em série têm como finalidade reduzir as quedas de tensões originadas pelas reatâncias indutivas. Apesar de proporcionarem um aumento de tensão, os bancos de capacitores em série não corrigem o fator de potência da mesma maneira que os bancos de capacitores em paralelo (derivação), logo, as correntes nas linhas não são significativamente reduzidas, ocasionando ainda, perdas consideráveis de energia no sistema. Essas características, junto com a sensibilidade a correntes e tensões transitória, fazem com que os capacitores em série sejam utilizados no controle de flutuação de tensão, amenizando as situações de *flickers* sobre o sistema (FRAGOAS, 2008).

2.3 BANCO DE CAPACITORES EM DERIVAÇÃO

Os bancos de capacitores em derivação em sistemas elétricos são utilizados para corrigir o fator de potência. Além disso, são utilizados nos sistemas de distribuição das concessionárias e nas subestações de potência, com a finalidade de reduzir as perdas e elevar a tensão do sistema (MAMEDE, 2011).

A instalação de bancos de capacitores em derivação, em pontos estratégicos do sistema e em diferentes níveis de tensão, proporciona uma melhor utilização do sistema elétrico, com reflexos positivos na qualidade e no custo da energia entregue aos consumidores.

Assim, a utilização de banco de capacitores em derivação (Figura 3), em sistemas de transmissão e distribuição de energia e em instalações industriais, traz os seguintes benefícios:

- Correção do fator de potência;
- Controle de tensão;
- Redução das perdas;
- Elevação da capacidade da rede.

Esses benefícios se aplicam aos sistemas de distribuição e transmissão (NATARAJAN, 2005).

Figura 3 - Banco de Capacitores em derivação.

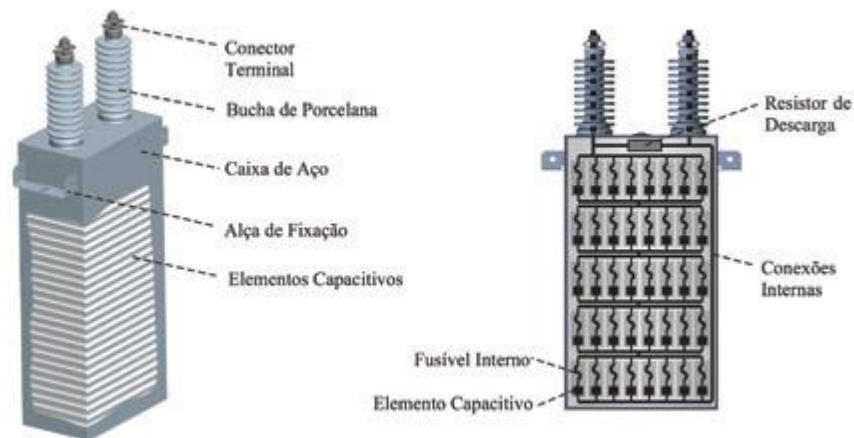


Fonte: (CAMPOS, 2013)

2.3.1 Unidade Capacitiva

Uma unidade de capacitor é formada por diversos elementos capacitivos, montados em uma configuração série-paralela de forma a fornecer uma determinada quantidade de potência reativa sob uma definida tensão de operação. A Figura 4 ilustra uma unidade capacitiva monofásica e seus componentes básicos.

Figura 4 – Aspectos construtivos e componentes de uma unidade capacitiva



Fonte: (CAMPOS, 2013)

As unidades capacitivas podem ser configuradas de duas maneiras: monofásicas ou trifásicas. As unidades monofásicas são constituídas por uma ou duas buchas, sendo que para o caso de uma bucha, um dos terminais do capacitor é eletricamente conectado a caixa, e para o caso de duas buchas, os terminais e os elementos são isolados da caixa utilizando papel impregnado com óleo isolante. Nas unidades trifásicas, as fases podem ser conectadas em estrela ou delta, com ou sem acesso ao terminal de neutro. Estas unidades podem conter três ou quatro buchas, dependendo do tipo de conexão. (CAMPOS, 2013).

2.3.2 Capacitância

Segundo (CAMPOS, 2013), a capacitância de uma unidade capacitiva monofásica pode ser obtida a partir dos valores nominais de frequência, tensão e potência de acordo com a equação (1):

$$Q_c = U_c^2 \times 2\pi \times f \times C \quad (1)$$

onde:

Q_c – potência nominal da unidade capacitiva (VAr);

U_c – tensão de fase unidade capacitiva (V);

f – frequência nominal da unidade capacitiva (Hz);

C – capacitância da unidade capacitiva (F)

2.3.3 Cálculo da Potência de um Capacitor Trifásico

A potência de um capacitor trifásico, a partir dos valores monofásicos das capacitâncias (CAMPOS, 2013), pode ser calculada pela equação:

$$Q_C = U_F^2 \times \omega \times (C_A + C_B + C_C) \quad (2)$$

onde:

Q_C – potência reativa do banco (VAr);

C_A, C_B, C_C – capacitâncias medidas entre dois terminais de linha de um capacitor trifásico (F);

U_F – tensão de fase do sistema (V);

$\omega = 2 \pi f$ – frequência angular do sistema (rad/s);

2.3.4 Sobretensão à Frequências Industriais

Segundo as normas NBR 5282, IEC 60871-1 e a IEEE Std18, as unidades capacitivas devem suportar os níveis de tensão indicados no Quadro 1, onde U_N corresponde a tensão nominal do sistema.

Quadro 1 – Sobretensões admissíveis à frequência industrial.

Duração	NBR-5282 IEC 60871-1	IEEE Std18	Observação
Regime	$1,00U_N$	$1,00U_N$	Regime Permanente
12h por período de 24h	$1,10U_N$	-	Regulação de tensão do sistema e flutuações de tensão
30min por período de 24h	$1,15U_N$	$1,25U_N$	Regulação de tensão do sistema e flutuações de tensão
5min	$1,20U_N$	-	Elevação de tensão durante carga leve
1min	$1,30U_N$	$1,30U_N$	Faltas no sistema

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2013)

De acordo com as normas IEC 60871-1 e NBR 5282 , a energização de um banco de capacitores por um disjuntor sem reigitação resultam em sobretensões transitórias, cujo valor da primeira crista não excede $2\sqrt{2}$ vezes a tensão aplicada (valor eficaz) com duração de $\frac{1}{2}$ ciclos. Essas unidades capacitivas são construídas para aguentar esses níveis de sobretensão desde que não ultrapasse de 1000 chaveamentos por ano.

2.3.5 Sobrecorrentes

Segundo as normas NBR 5282, IEC 60871-1 e a IEEE Std18, as unidades capacitivas devem suportar as sobrecorrentes mostradas no Quadro 2, onde I_N corresponde a corrente nominal do sistema.

Quadro 2 – Sobrecorrentes admissíveis em unidades capacitivas.

Norma	Regime Permanente	Transitória
NBR 5282	$1,44I_N$	$100I_N$
IEC 60871-1	$1,43I_N$	$100I_N$
IEEE Std18	$1,35I_N$	Varia de acordo número de operações por ano.

Fonte: Adaptado de CAMPOS (2013)

2.4 BANCO DE CAPACITORES EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

A demanda de potência reativa de um sistema elétrico é obtida através de estudos que consideram possíveis cenários de operação (uma vez que esse cenário muda o tempo todo), as características da geração x carga e a topologia do sistema.

Depois de definido a quantidade de reativo solicitado pelo sistema e o ponto de conexão, deve-se determinar a potência de cada banco e a quantidade necessária de bancos, levando em conta critérios econômicos e técnicos. A instalação de dois ou mais bancos de capacitores em um mesmo barramento é possível, desde que cada banco seja manobrado e protegido individualmente, sem comprometer o sistema (CAMPOS, 2013).

Segundo CAMPOS (2013), a faixa de potência máxima de um banco é determinada pela variação de tensão no sistema após a conexão ou desconexão do banco e também pela capacidade dos dispositivos de manobra. A variação de tensão em uma barra após a conexão e desconexão de um banco de capacitores pode ser medida pela relação entre a potência de curto-circuito desta barra e a potência do banco, de acordo com a equação.

$$\Delta U = \frac{Q_C}{S_{CC}} \quad (3)$$

Onde:

ΔU – variação da tensão (p.u);

Q_C – potência do banco de capacitores (VAr);

S_{CC} – potência de curto-circuito na barra do banco de capacitores (VA).

2.4.1 Manobra de Banco de Capacitores

Os bancos de capacitores, concebidos para suporte de tensão e controle de reativos de sistemas de transmissão e distribuição de energia, são manobrados em função da curva de carga. Ou seja, os bancos são ligados durante os períodos de carga pesada e/ou média e desligados durante os períodos de carga leve para manter o bom funcionamento do sistema elétrico de potência.

Durante o chaveamento de banco de capacitores por equipamentos de manobra como disjuntores ou seccionador, há o aparecimento de transitórios cujos efeitos nos equipamentos de manobra e nos banco de capacitores poderá causar um desgaste, diminuindo a vida útil dos equipamentos. Quando ocorre o chaveamento, a corrente e a tensão transitória resultante apresentam valores altos em módulo e frequência.

Em relação à manobra de banco de capacitores, existem duas condições possíveis: energização de um banco isolado e energização de um banco com a presença de um ou mais bancos em operação no mesmo barramento e/ou subestação, conhecida como *back to back*. O chaveamento de um banco isolado ocasiona em altas sobretensões, enquanto que o chaveamento de banco *back to back* causa elevadas magnitudes de correntes *inrush* no sistema. (SCHWARZ,2013).

O chaveamento de um banco de capacitor isolado é a condição menos rigorosa, porque a impedância do sistema atua como fator limitante para correntes transitórias. A frequência de oscilação para este caso é inferior a 1.000 Hz, o que facilita a transferência de surtos de tensão, através de transformadores, para sistemas com menores níveis de tensão (CAMPOS, 2013).

Durante a energização, as magnitudes dos transitórios, bem como a duração, dependem do instante em que o banco é chaveado em relação à onda de tensão (0° e 90°) (SCHWARZ,2013).

Estes tipos de chaveamentos resultam em uma tensão transitória oscilatória com frequência primária entre 300 a 900Hz e o pico de magnitude pode chegar a 2 p.u., mas é tipicamente 1,3 p.u. a 1,5 p.u. com duração entre 0.5 e 3 ciclos dependendo do amortecimento do sistema (DUGAN, 2003). Devido aos transitórios surgem então os problemas de qualidade de energia, que podem ocasionar perturbações às instalações consumidoras de um determinado circuito.

Para a análise dos sinais de transitórios, gerados pelos chaveamentos de banco de capacitores em um sistema teste, será utilizado a Transformada de Fourier Janelada, a qual será melhor explicada no próximo capítulo.

3 TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA

A análise do sistema elétrico de potência tem sido realizada considerando a corrente e tensão estacionárias. Porém, em um sistema de potência real, os sinais geralmente não são estacionários. Mesmo durante a operação normal de funcionamento as estatísticas da amplitude e frequência da tensão e corrente podem mudar ao longo do tempo.

Para análise de um sistema, um dos métodos de processamento de sinais são as decomposições de dados baseado em transformadas: este método decompõe o sinal em componentes como harmônicos e inter harmônicos. E estas componentes podem ser apresentadas de duas maneiras:

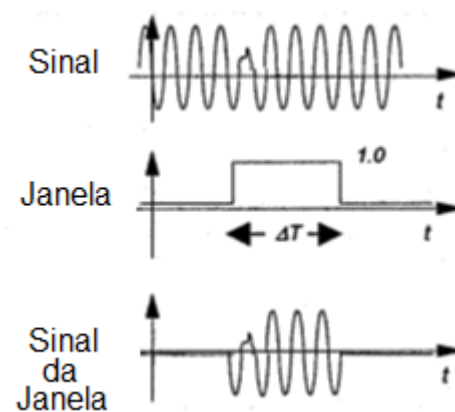
- Análise do domínio da frequência: Ideal para sinais estacionários.
- Análise no domínio tempo-frequência: Ideal para sinais não estacionários.

A transformada de Fourier (TF) é uma representação no domínio da frequência de uma função no tempo. Sua desvantagem é que, ao transformar a informação do domínio do tempo para o domínio da frequência, a informação do tempo é perdida – essa informação não é necessária quando o sinal é estacionário. Ao olhar para a TF de um sinal é impossível dizer quando um determinado evento aconteceu. A maior parte dos sinais, entretanto, contém características não estacionárias ou transitórias, tais como: mudanças abruptas e eventos intermitentes. Exemplos de forma de onda não estacionários são os transitórios causados no chaveamento de banco de capacitores, energização de linhas, correntes de energização de transformadores etc. Essas características são as mais importantes de um sinal (CARVALHO, 2013). Então, podemos dizer que a TF não é adequada para detectar transitórios que ocorrem no sistema elétrico de potência.

Uma maneira de corrigir essa desvantagem foi apresentada por Dennis Gabor que a adaptou a TF para transformar apenas uma pequena parte do sinal por vez, denominada janelamento de sinal (MISITI, 1997).

A principal ideia da Transformada de Fourier Janelada (TFJ) consiste em multiplicar o sinal de entrada $x(t)$ por uma determinada função $w(t)$ cuja função é variável no tempo, ou seja, repartindo o sinal em pequenos segmentos no tempo, e aplicar a TF para cada fração de tempo (JARAMILLO et al., 2000).

Figura 5 – Janelamento do sinal



Fonte: JARAMILLO, 2010

Desta maneira, segundo (JARAMILLO et al., 2000), a TFJ capacita-nos a analisar uma função $f(t)$, um sinal em estudo, podendo localizar informações nos domínios do tempo e da frequência, e a precisão dessa informação é determinada pelo tamanho da janela, exemplificado na Figura 5.

Na determinação da representação de Fourier dependente do tempo, há uma motivação pela necessidade de uma representação espectral a qual reflète as propriedades variando no tempo de determinados sinais.

Uma definição da transformada de Fourier janelada é (DE SOUZA, 2014):

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(t-m).x(m).e^{-j\omega m} \quad (4)$$

Na expressão acima, $w(t-m)$ é uma sequência de janelas reais as quais determinam a porção de entrada do sinal que recebe ênfase para um índice de tempo particular, t . A transformada de Fourier dependente do tempo é uma função de duas variáveis: o índice tempo, t , o qual é discreto e a variável frequência, w , a qual é contínua. Outra forma da equação anterior é alcançada por uma mudança no índice do somatório a qual nos dá a seguinte expressão:

$$X_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} w(m)x.(t-m).e^{-j\omega(t-m)} \quad (5)$$

$$X_t(e^{j\omega}) = e^{-j\omega t} \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t-m) \cdot w(m) \cdot e^{j\omega m} \quad (6)$$

onde $\omega = \frac{2\pi k}{N}$ é a frequência em radianos,

N é o número de bandas de frequências k, com $k = 0, 1, \dots, N-1$.

w(m) é a janela selecionada simétrica de tamanho L.

$L \leq N$ se a reconstrução do sinal é requerida.

Se definir,

$$\tilde{X}_t(e^{j\omega}) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(t-m) \cdot w(m) \cdot e^{j\omega m} \quad (7)$$

Então $X_t(e^{j\omega})$ por ser expressa como:

$$X_t(e^{j\omega}) = e^{-j\omega t} \cdot \tilde{X}_t(e^{j\omega}) \quad (8)$$

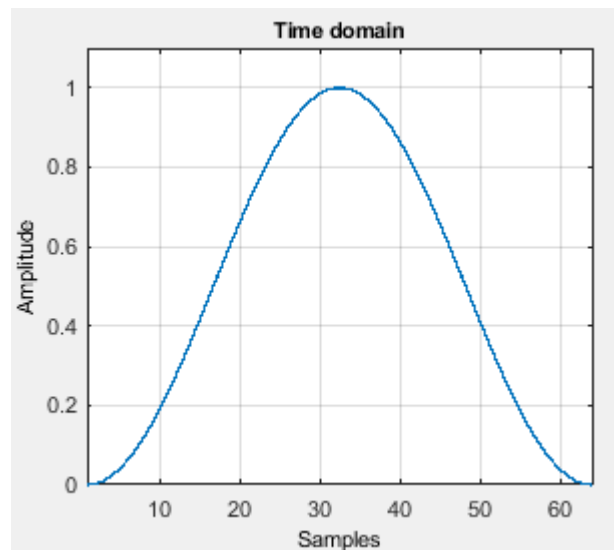
Estas expressões podem ser interpretadas de duas formas distintas. Primeira, se assumir que t é fixo, nota-se que $X_t(e^{j\omega})$ é a transformada normal da sequência $w(t-m)x(m)$, $-\infty < m < \infty$, observado na Equação 4. Portanto, t fixo $X_t(e^{j\omega})$ tem a propriedade de uma transformada de Fourier normal. Segunda, considera a expressão $X_t(e^{j\omega})$ como uma função do tempo t com w fixo. Pode-se observar que as equações 4 e 7 estão na forma de convolução. Deste modo esta interpretação permite-nos considerar a representação de Fourier dependente do tempo (DE SOUZA, 2014).

Neste trabalho iremos utilizar a janela de Hanning. A mesma pode ser escrita como segue, onde M é o número de amostras:

$$w(n) = \begin{cases} 0.5 - 0.5 * \cos\left(\frac{2\pi n}{(M-1)}\right), & 0 \leq n \leq M-1 \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (9)$$

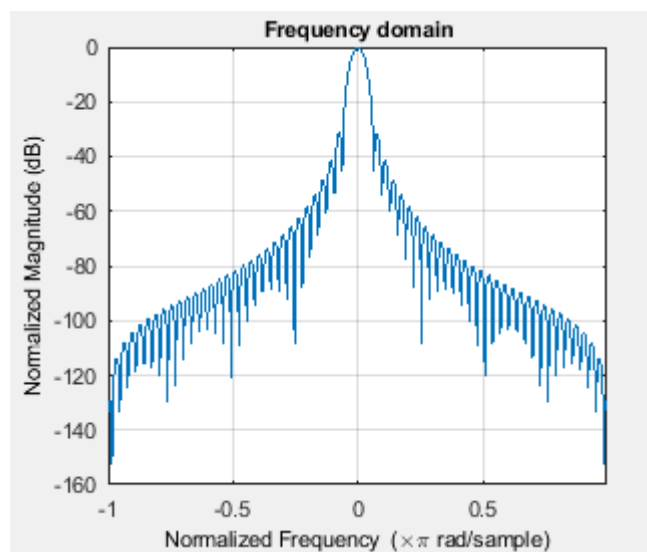
As figuras abaixo mostram a janela de Hanning no domínio do tempo e sua respectiva resposta em frequência.

Figura 6 – Janela de Hanning



Fonte: Autoria Própria – software MATLAB

Figura 7 - Resposta em frequência



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

4 METODOLOGIA APLICADA

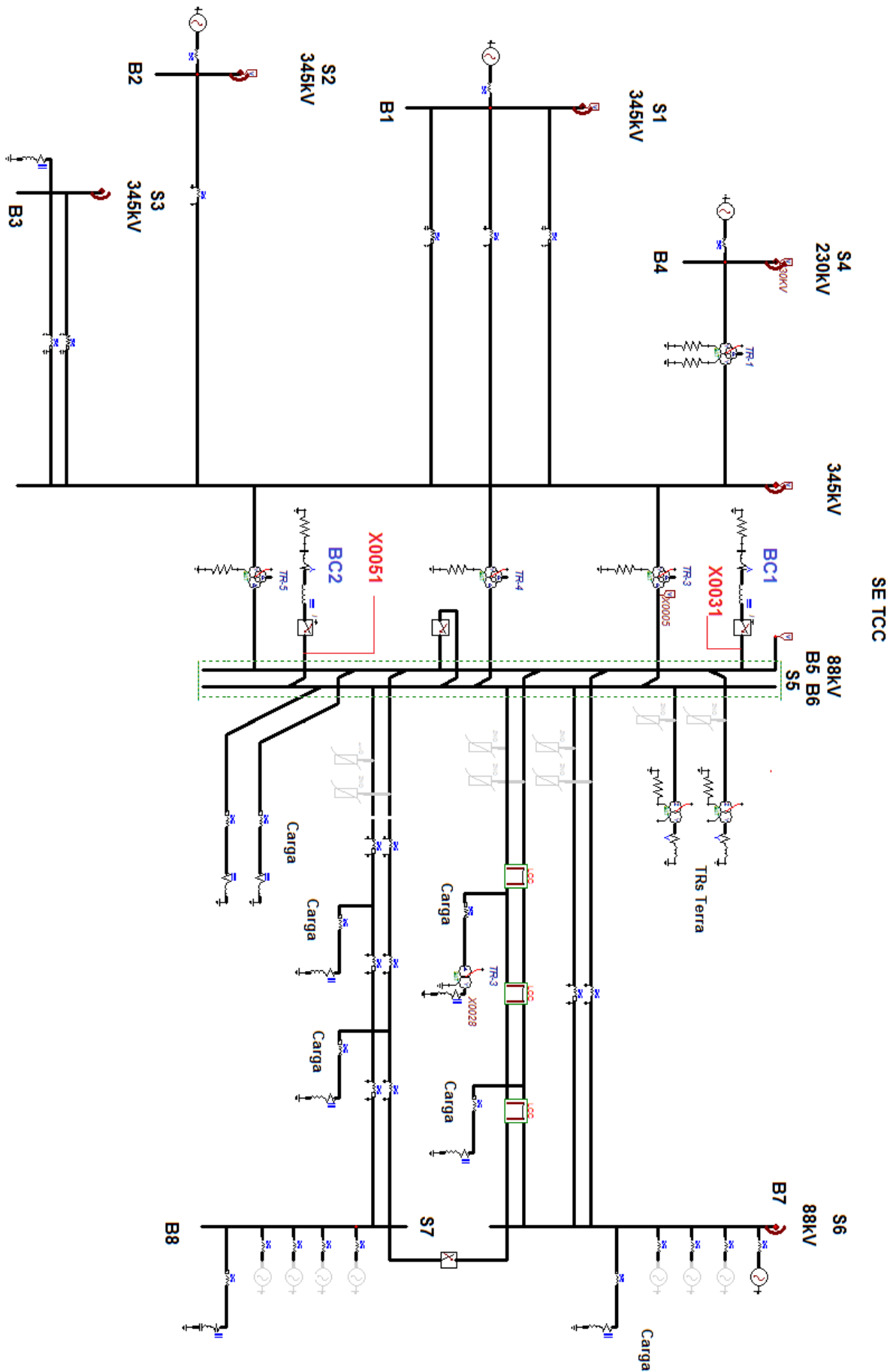
4.1 SISTEMA ELÉTRICO ANALISADO

Uma vez que foi definido o foco e importância do trabalho, busca-se a representação destes transitórios, decorrentes de chaveamento de bancos de capacitores em derivação, para levantar as magnitudes e frequências características para as harmônicas predominantes. A caracterização do mesmo foi possível com a utilização do *software* ATP (*Alternative Transients Program*) (PEREIRA, 1998).

O ATP é um programa digital utilizado para simular transitórios eletromagnéticos, assim como fenômenos de natureza eletromecânica em sistemas elétricos de potência. O programa utiliza a regra de integração trapezoidal, um método numericamente estável e robusto, para converter equações diferenciais de uma rede elétrica em equações algébricas. O programa permite representar uma grande diversidade de elementos que podem ser interconectados em uma rede elétrica, como capacitâncias, indutâncias, resistências, chaves, reatores, transformadores, entre outros elementos (PEREIRA, 1998). O ATP permite a simulação do sistema elétrico em estudo e a obtenção de resultados próximos do sistema elétrico real. Neste trabalho será utilizado o ATPDraw, uma versão gráfica do ATP tradicional, por facilitar a modelagem e simulações dos casos a serem analisado.

O sistema de transmissão a ser analisado é parte de um sistema real, onde o perfil de tensão, devido a grande concentração de carga no setor de 88 kV, está abaixo do nominal, sendo, portanto, necessário aplicação de bancos de capacitores em derivação para melhorar o perfil de tensão do sistema em estudo. A partir deste modelo, foram simuladas a energização dos bancos de capacitores BC1 e BC2, com potência de 63 MVar, respectivamente, para a obtenção das tensões do sistema, as quais serão utilizadas como entrada para a aplicação da TFJ. Nas simulações desenvolvidas foi utilizada uma taxa amostral de 3,84 kHz, uma vez que estamos buscando analisar conteúdo de frequências menores a 1 kHz. O sistema elétrico utilizado, modelado em ATPDraw, foi gentilmente cedido por um agente de Transmissão do Setor Elétrico Brasileiro, podendo ser visualizado na Figura 8.

Figura 8 – Sistema Elétrico de Potência estudado.



Os dados do sistema em estudo podem ser observados nos quadros a seguir.

Quadro 3 – Dados das barras do sistema simulado.

Barra	Sub.	Eq. tensão [V]	T [kV]	R0 (ohm/m)	L0 (ohm)	R+ (ohm/m)	L+ (ohm)
B1	S1	354000	345	0,677	5,966	0,279	5,698
B2	S2	327000	345	0,439	16,186	3,695	4,853
B3	S3	345000	345	0,000	0,000	0,000	0,000
B4	S4	231000	230	0,958	1,399	1,505	17,137
B5	S5	88000	88	0,000	0,000	0,000	0,000
B6	S5	88000	88	0,000	0,000	0,000	0,000
B7	S6	152000	88	1,000	11,113	1,000	89,916
B8	S7	88000	88	9,033	27,855	3,179	83,558

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 4 – Dados das cargas do sistema simulado.

Barra	Sub.	Eq. tensão (V)	T (kV)	Carga R_1 (Ω)	Carga L_1 (Ω)	Carga C_1 (μS)	Carga R_2 (Ω)	Carga L_2 (Ω)	Carga C_2 (μS)	Carga R_3 (Ω)	Carga L_3 (Ω)	Carga C_3 (μS)
B1	S1	354000	345	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
B2	S2	327000	345	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
B3	S3	345000	345	699,20	221,30	0,000	699,200	221,30	0,000	699	221,30	0,00
B4	S4	231000	230	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,00
B5	S5	88000	88	3068,9	623,03	0,000	3068,89	623,03	0,000	3068,9	623,00	0,00
B6	S5	88000	88	938,36	407,60	0,000	261,500	118,40	0,000	261,5	118,40	0,00
B7	S6	152000	88	16,670	4,700	0,000	16,670	4,700	0,000	16,700	4,700	0,00
B8	S7	88000	88	82,480	22,600	1,000	82,480	22,600	1,000	82,500	22,600	1,00

Fonte: Autoria Própria.

Quadro 5 – Dados das linhas do sistema simulado.

LINHA	QTD	R+ (ohm/m)	R0 (ohm/m)	L+ (ohm/m)	L0 (ohm/m)	C+ ($\mu S/m$)	C0 ($\mu S/m$)
S1 - 345K	3,0000	0,9522	9,4029	96,4102	30,2323	122,7500	71,0800
S2 - 345K	1,0000	0,9522	77,3662	92,8394	32,3748	95,6100	57,6400
S3 - 345K	2,0000	0,1190	0,9522	14,2829	4,1658	1,0000	1,0000
S4 – 345	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
S5 - S6	2,0000	0,5665	2,3439	2,2038	6,1080	20,8000	12,5000
S5 - S7	2,0000	0,3556	2,0548	1,8779	5,7726	13,2510	12,7600

Fonte: Autoria Própria.

Onde:

R^+ - é a reatância de sequência positiva;

L^+ - é a indutância de sequência positiva;

C^+ - condutância de sequência positiva;

R^0 - é a reatância de sequência zero;

L^0 - indutância de sequência zero;

C^0 - condutância de sequência zero;

Carga $R_1, L_1, C_1 / R_2, L_2, C_2 / R_3, L_3, C_3$ - são as cargas equivalentes do sistema simulado;

4.2 METODOLOGIA DE APLICAÇÃO DA TRANSFORMADA DE FOURIER JANELADA

A etapa seguinte será feita uma análise no domínio da frequência realizada após a obtenção dos resultados dos estudos de casos simulados. A análise dos sinais transitórios será realizada por meio da Transformada de *Fourier* Janelada com a utilização da janela de *Hanning*. O sinal em análise é janelado com janelas de 4 ciclos à passos de 2 ciclos.

Utilizando-se do *software* Matlab, os sinais em análise são submetidos a uma avaliação de suas energias por meio da função *spectrogram*. A função *spectrogram* fornece informações no domínio do tempo e da frequência, simultaneamente. Estas informações são obtidas com a aplicação a cada segmento do sinal janelado pela própria função *spectrogram*.

A função *spectrogram* necessita de dados de entrada, como por exemplo: o sinal a ser analisado, o tamanho da janela, a frequência de amostragem do sinal em análise e o tipo da janela utilizada para obtenção do conteúdo espectral. As informações obtidas da função são: o espectrograma do sinal analisado, ou seja, a magnitude desse sinal, as frequências e o tempo para qual o espectrograma foi calculado através da Transformada Rápida de Fourier. Essas magnitudes são plotadas de maneira a corresponder a cada múltiplo da frequência fundamental do sistema, 60 Hz.

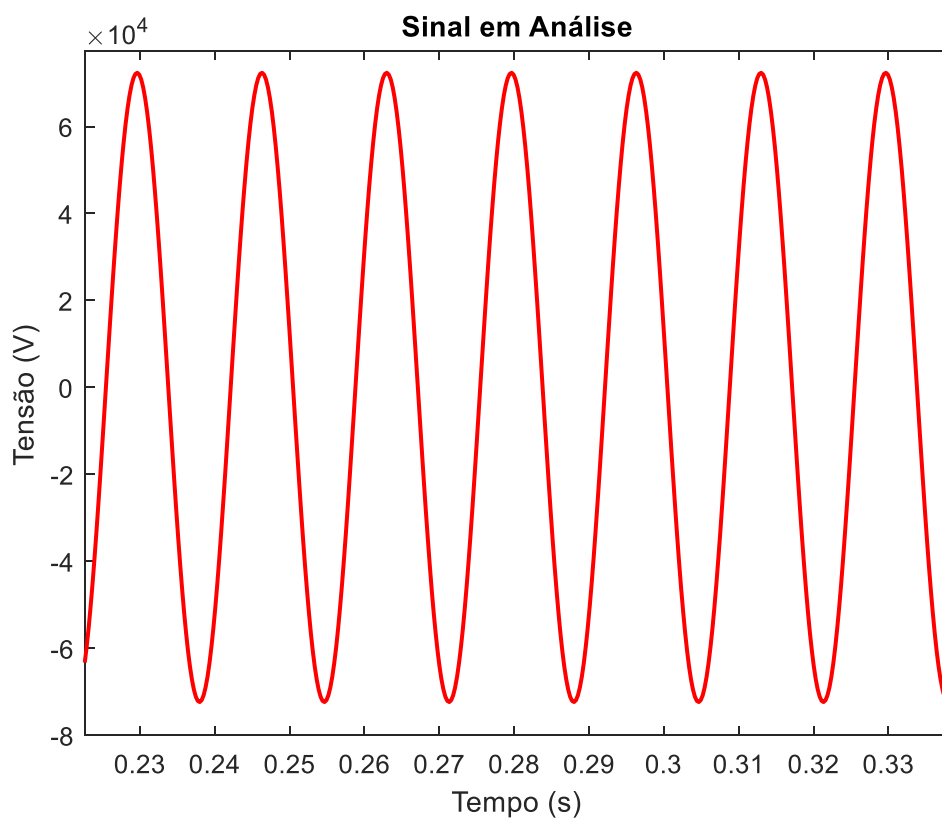
Geralmente, as componentes harmônicas de ordem superior (entre 25ª a 50ª harmônica, dependendo do sistema) são insignificantes para a análise do sistema de potência. Embora possam originar interferência em dispositivos eletrônicos de baixa potência, eles geralmente não são prejudiciais ao sistema (DUGAN, R. C et al, 1996).

Serão consideradas, para fins de estudos neste trabalho, as componentes harmônicas até a 15ª ordem onde estas são normalizadas em relação a uma janela de análise de um sinal de tensão em regime permanente sem nenhum distúrbio.

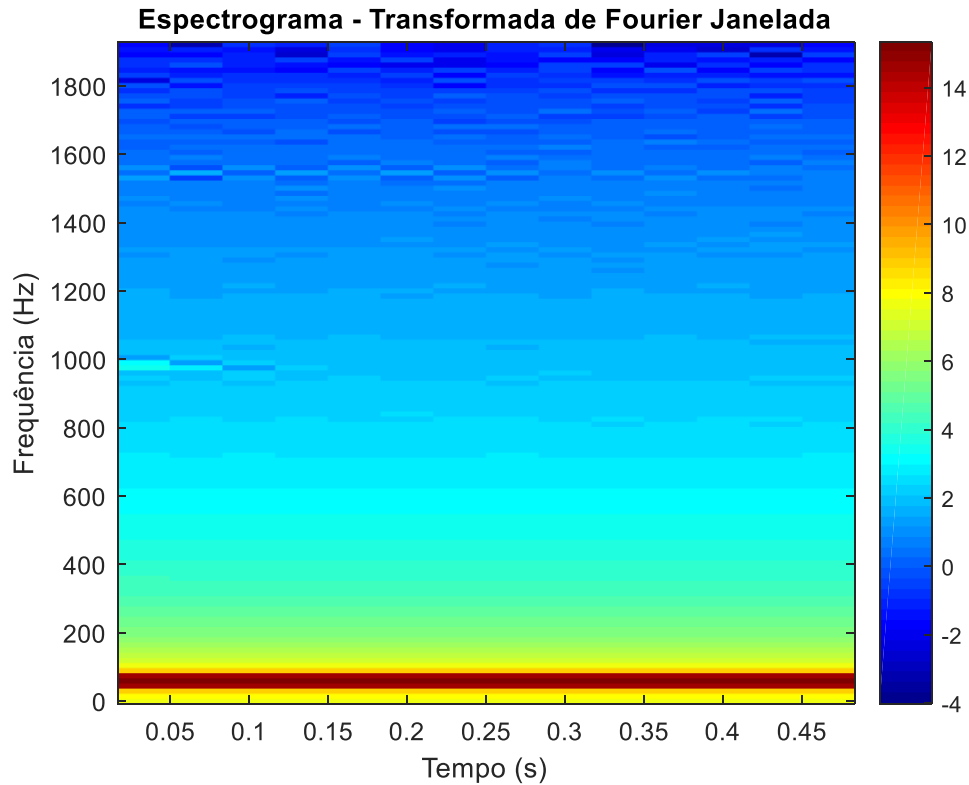
Para uma melhor visualização do resultado da função *spectrogram* serão ilustrados dois exemplos de sinais, um sinal sem transitório e um outro sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.

A Figura 9, a seguir, mostra um exemplo de um sinal senoidal puro, sem transitório.

Figura 9 – Sinal senoidal sem transitório.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

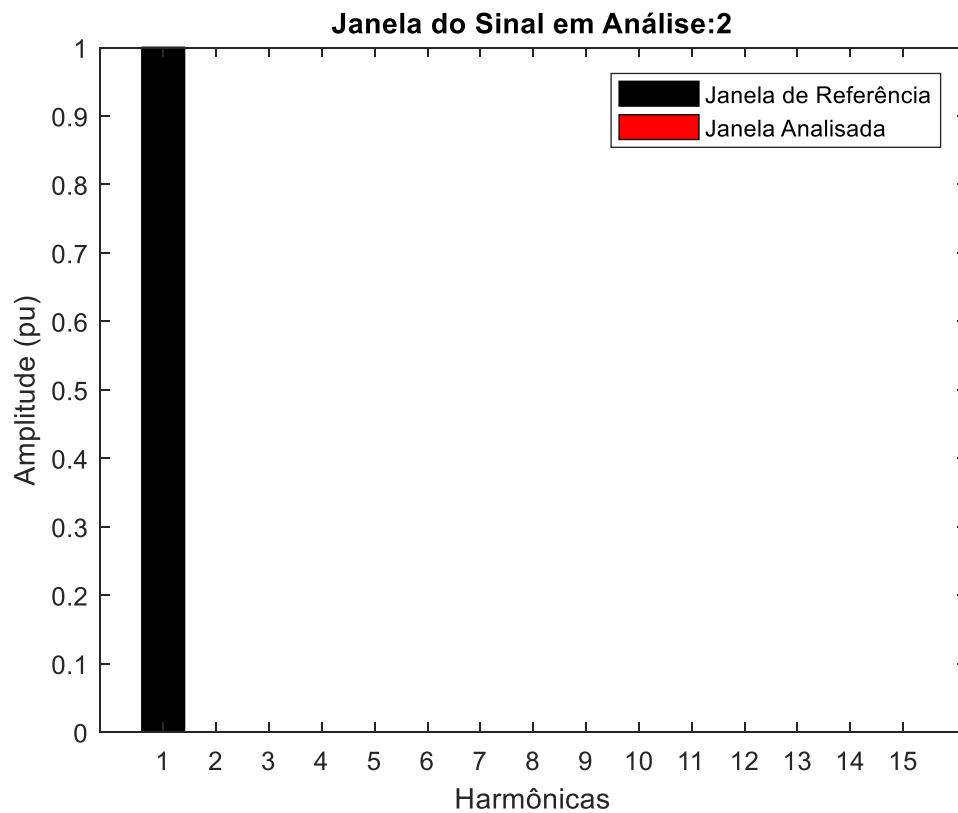
Figura 10 – Espectrograma do sinal sem transitório.

Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

De acordo com a barra de cores, ao lado na Figura 10, observa-se que a cor vermelha representa uma maior concentração de energia enquanto a cor azul uma menor presença de energia nas devidas faixas de frequência correspondentes.

Observa-se que em um sinal senoidal, sem transitórios, apenas existirá uma concentração de energia na faixa de frequência de 60 Hz e nas demais faixas essa energia é atenuada conforme a faixa frequência aumenta, mostrando então uma correta interpretação quanto ao conteúdo espectral. A Figura 11, apresenta as magnitudes obtidas por meio da função *spectrogram* do sinal sem transitório.

Figura 11 – Harmônica do sinal sem transitório

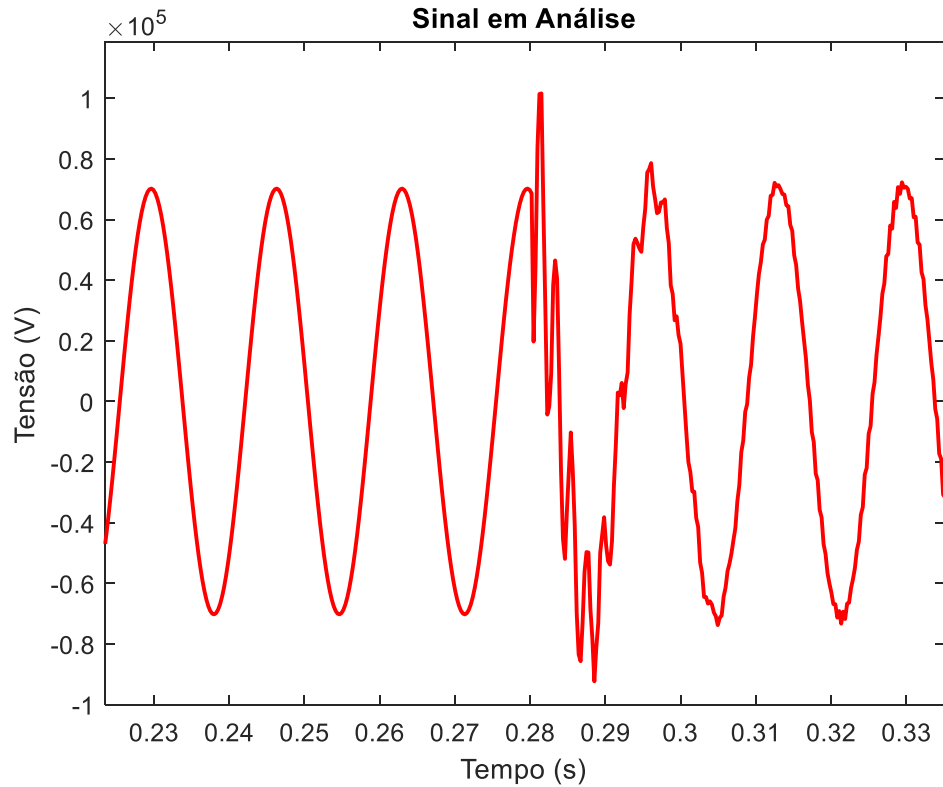


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

A figura acima foi construída comparando a magnitude do sinal analisado sem transitório com o sinal de referência, e nesse caso esses sinais são idênticos, por esse motivo o sinal de referencia está sobrepondo o sinal analisado.

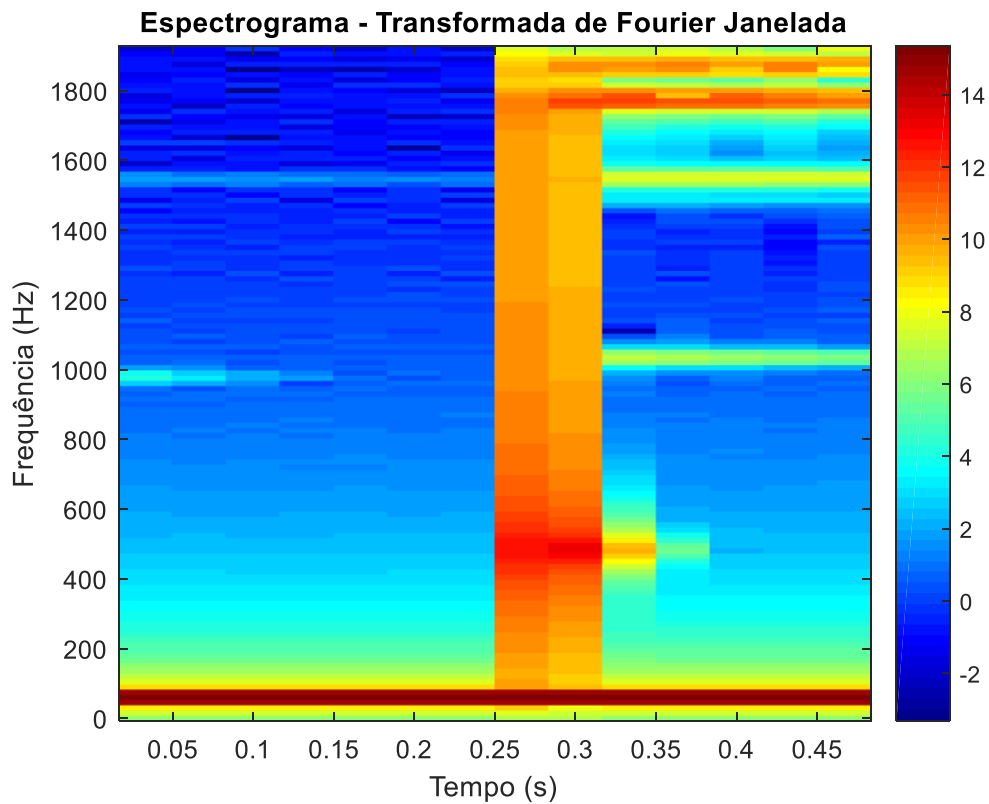
Em seguida, será ilustrado um exemplo de um sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores, Figura 12.

Figura 12 - Sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Figura 13 – Espectrograma de sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.

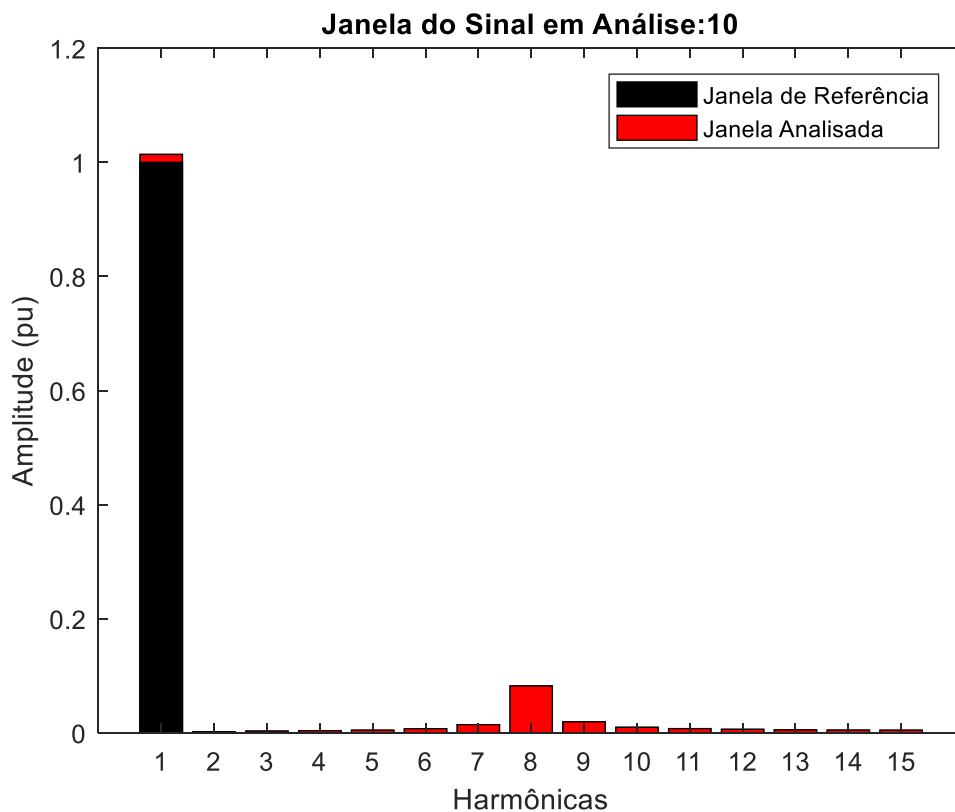


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Com relação à Figura 13, percebe-se mais uma vez que existe uma maior concentração de energia na faixa de frequência de 60 Hz, e em outras faixas essa energia é significativamente atenuada mostrando assim, uma correta interpretação quanto ao conteúdo espectral. A análise também pode ser feita com relação ao tempo, onde se percebe uma região de menor concentração de energia seguida de uma região com maior concentração, na vertical, dando a ideia de qual foi o instante que o distúrbio teve seu início.

As magnitudes obtidas por meio da função *spectrogram* foram normalizadas, como mencionado anteriormente, e nesse caso comparou-se o sinal resultante de um chaveamento e o sinal sem transitório como referência.

Figura 14- Harmônicos do sinal resultante de um chaveamento de banco de capacitores.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

A Figura 14 mostra essa normalização a qual caracteriza tal chaveamento de um banco de capacitores, onde vimos um leve aumento na amplitude de frequência fundamental, assim como um aumento entorno da frequência de 480Hz, característico deste tipo de chaveamento do sistema.

Deste modo, explicado todo o procedimento para obtenção das informações relativas às magnitudes espectrais do sinal em estudo, pode-se classificar o transitório em questão, como serão apresentados os resultados no capítulo a seguir.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Para a obtenção e análise dos sinais transitórios, foram realizadas quatro casos de manobras de banco de capacitores diferentes. Os casos de chaveamento serão estudados utilizando o BC1 e BC2 estáticos situados nos pontos, ilustrados na Figura 8, X0031 e X0051, respectivamente, ambos com potência de 63 MVar, no barramento 88 kV. O tempo de simulação utilizado foi de $t = 0,5$ s para todos os casos analisados. Esta escolha se deve pelo fato do transitório estudado ser um evento cuja duração no sistema elétrico é curta (milissegundos) e também para uma melhor compreensão do resultado de um chaveamento no sistema elétrico. Em todos os casos simulados a medição foi realizada no Barramento de 88 kV.

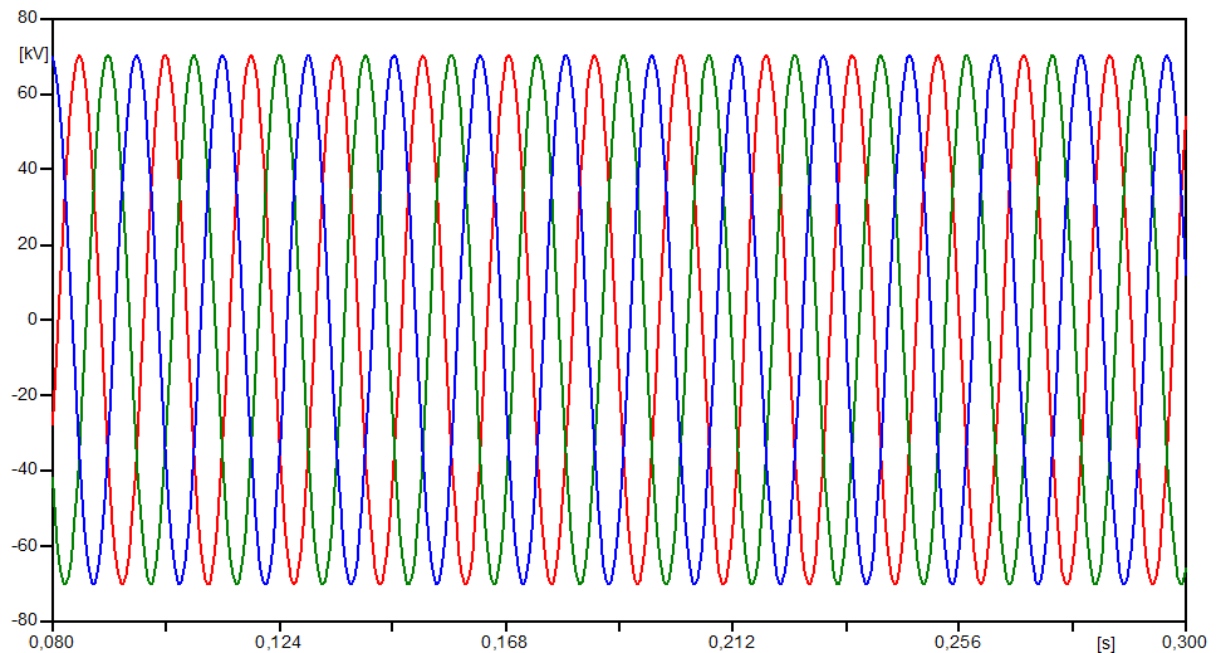
Para cada caso, utilizaram-se os seguintes tempos de fechamento (t_{cl}) dos bancos de capacitores:

- Caso 1 - Chaveamento a 0° do banco BC1 no barramento de 88 kV: $t_{cl1} = 0.19764s$, $t_{cl2} = 0.20377s$, $t_{cl3} = 0.20884s$ (corresponde aproximadamente ao instante de mínima tensão);
- Caso 2 - Chaveamento a 90° do banco BC1 no barramento de 88 kV: $t_{cl1} = 0.30206s$, $t_{cl2} = 0.30727s$, $t_{cl3} = 0.3130s$ (corresponde aproximadamente ao instante de máxima tensão);
- Caso 3 - Chaveamento do banco BC2 a 0° , considerando que o BC1 já esteja ligado no barramento de 88 kV (*Back to back*): $t_{cl1} = 0.19764s$, $t_{cl2} = 0.20377s$, $t_{cl3} = 0.20884s$ (corresponde aproximadamente ao instante de mínima tensão) e para o banco fixo BC1 usou-se $t_{cl1} = t_{cl2} = t_{cl3} = -1s$;
- Caso 4 - Chaveamento do banco BC2 a 90° , considerando que o BC1 já esteja ligado no barramento de 88 kV; (*Back to back*): $t_{cl1} = 0.30206s$, $t_{cl2} = 0.30727s$, $t_{cl3} = 0.3130s$ (corresponde aproximadamente ao instante de máxima tensão) e para o banco fixo BC1 usou-se $t_{cl1} = t_{cl2} = t_{cl3} = -1s$.

5.1 CASO BASE

Esta simulação do circuito, com os bancos BC1 e BC2 desligados, apresenta a resposta em regime permanente do sistema (sem transitórios), considerado como caso base para comparação com os demais casos. A Figura 15, a seguir, exibe a simulação das tensões de pico no barramento de 88 kV da subestação.

Figura 15 – Sinal trifásico das tensões do caso base.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw

As tensões do barramento de 88 kV são fornecidas, no quadro abaixo, juntamente com seus respectivos tempos de simulação em que foram obtidas. O valor da tensão de fase B será utilizada como base para comparação com os demais casos neste trabalho e será considerado com 1 pu.

Quadro 6 - Tensões no barramento de 88 kV, caso base.

Barramento	FASE A		FASE B		FASE C	
	V pico (kV)	Tempo (s)	V pico (kV)	Tempo (s)	V pico (kV)	Tempo (s)
88 kV	70,235	0,18514	70,183	0,19061	70,224	0,19634

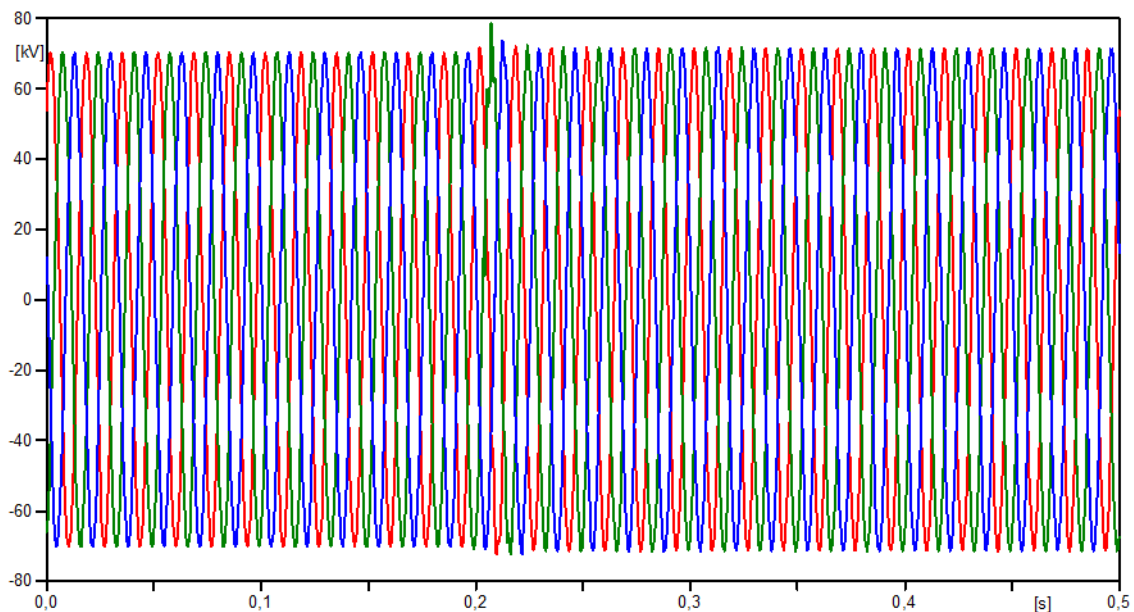
Fonte: Autoria Própria.

Analisando as tensões, pode-se observar que nível de tensão do sistema está um pouco abaixo do que é solicitado. O barramento de 88 kV em análise possuiria uma tensão da pico nominal de 71,85kV. Desta forma, observando o Quadro 6, percebe-se que a tensão de pico esta abaixo da nominal, e que a utilização de banco de capacitores neste barramento pode melhorar o seu nível de tensão, e, conseqüentemente, atender de forma mais adequada às cargas conectadas a esta Subestação.

5.2 ANÁLISE DO CASO 1

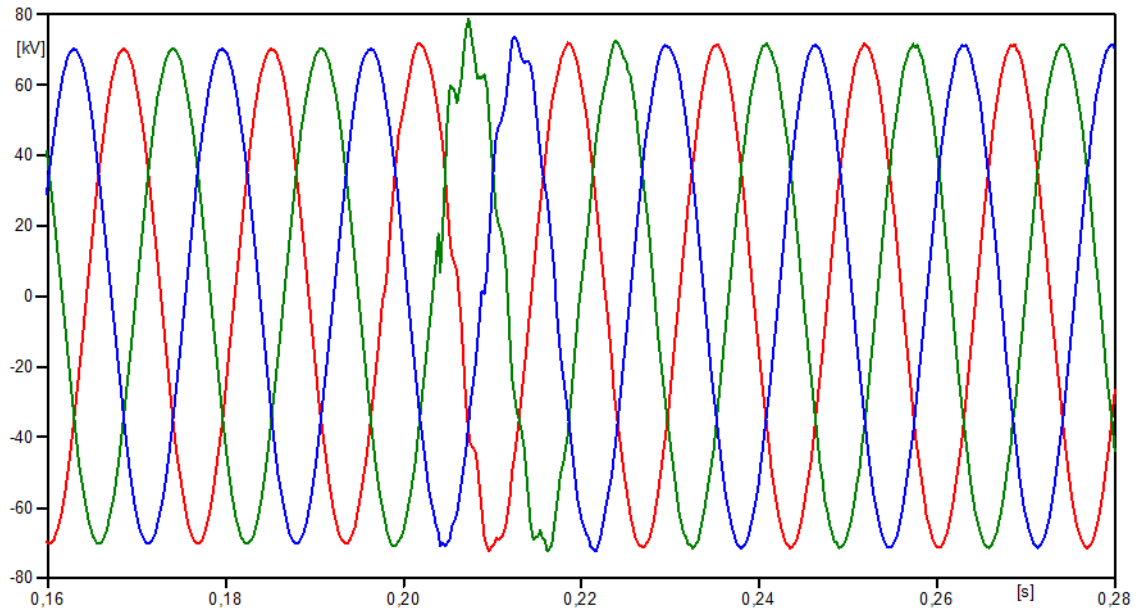
Este caso simula uma situação de chaveamento a 0° de um único banco de capacitores. Observando as figuras 16 e 17, verifica-se para o chaveamento a 0°, a tensão apresenta uma leve distorção na fase B do que nas outras fases.

Figura 16 – Sinal trifásico das tensões do caso 1.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw

Figura 17 – Zoom do Sinal trifásico das tensões do caso 1.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

O Quadro 7, a seguir, nos mostra os valores de pico das tensões em cada fase.

Quadro 7 - Tensões no barramento de 88 kV, caso 1.

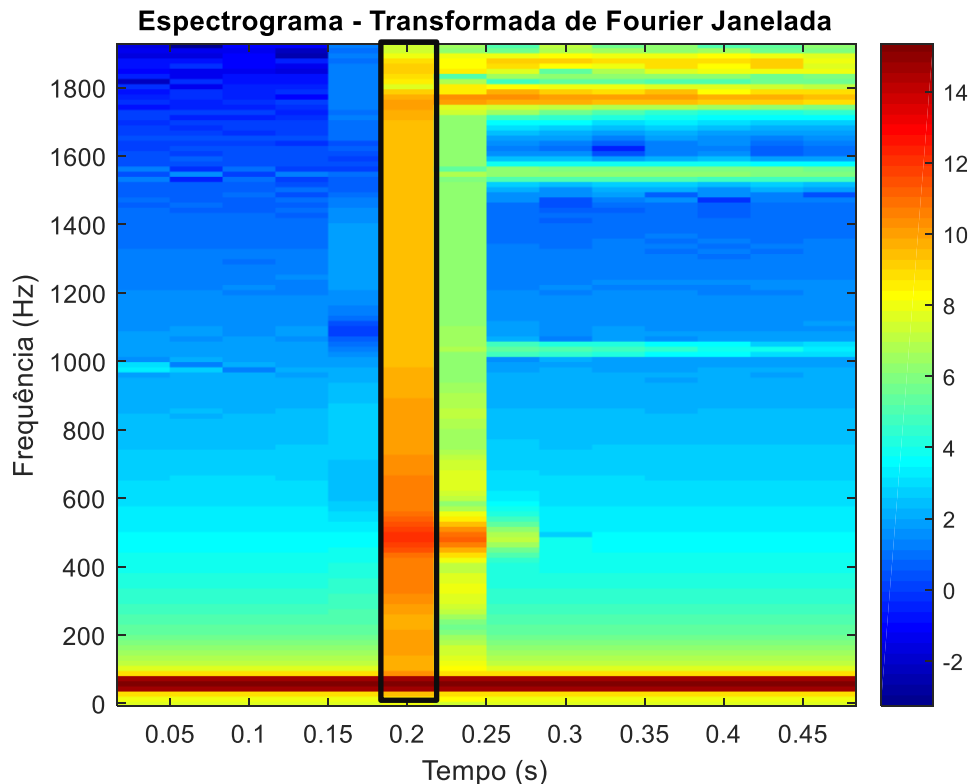
Barramento	FASE A			FASE B			FASE C		
	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)
88 kV	71,869	0,2185	1,023	78,715	0,2073	1,122	73,601	0,2125	1,048
Aumento em relação ao caso base	2,3%			12,22%			4,80%		

Fonte: Autoria Própria.

Verifica-se que o chaveamento de um banco de capacitor isolado a 0° resultou em pico de tensão com o valor de 1,122 pu considerando a influência de todas as componentes harmônicas presentes no sinal.

A seguir, foi obtida a representação da energia do sinal em análise, a partir da função *spectrogram*, onde será evidenciado o comportamento de tal distúrbio para a fase B.

Figura 18 – Espectrograma do sinal resultante do caso 1.

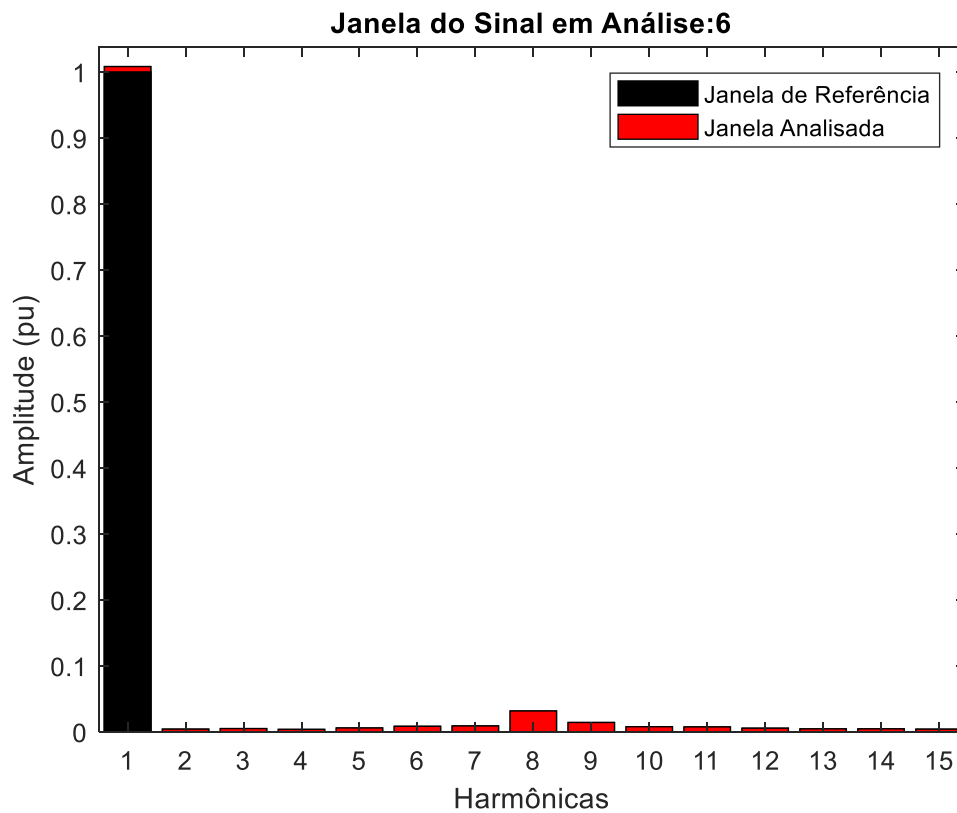


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Na análise da Figura 18 é possível verificar as informações nos domínios tempo e frequência. Percebe-se uma concentração maior de energia em torno da frequência de 60 Hz, a frequência fundamental. Em seguida, observa-se uma grande concentração de energia do distúrbio na janela 6 (indicado na Figura 18), e seus respectivos conteúdos de frequências envolvidos, bem como a faixa correspondente ao tempo próximo de 0,2s sendo esta uma caracterização do momento inicial do distúrbio.

As magnitudes obtidas da função *spectrogram* foram normalizadas e a Figura 19, nos mostra as características do chaveamento do banco de capacitor do caso em análise. Para esse caso foi retirado a informação da fase B, onde se percebe uma maior distorção em relação às outras fases, para uma melhor visualização do comportamento devido ao chaveamento isolado a 0°.

Figura 19 - Harmônicos da Janela 6 do sinal em análise.

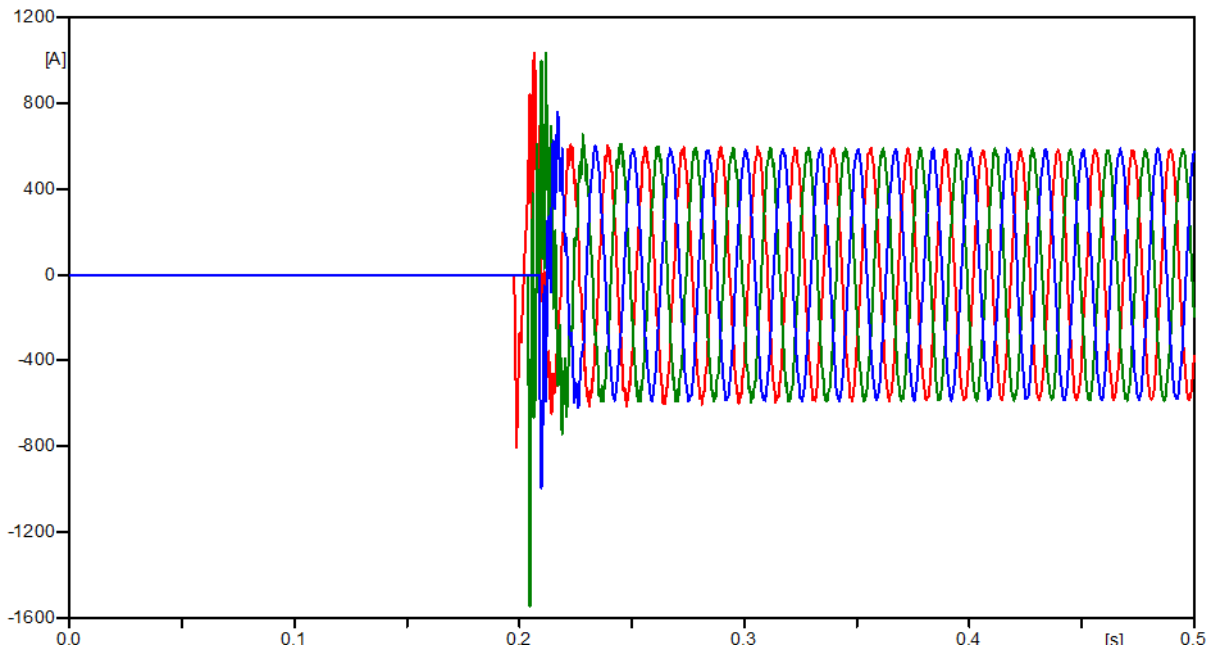


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

O chaveamento a 0° pode ser considerado a menor condição de impacto no sistema, pois a energização do banco acontece no instante em que a tensão de cada fase está passando pelo seu valor mínimo. Então, pode-se observar uma e uma pequena concentração de energia na faixa da 6ª à 11ª harmônicas (360 à 660 Hz), sendo a harmônica de 8º ordem a mais evidente.

O comportamento da corrente no BC1 pode ser observado na Figura 20, onde se percebe uma ausência de corrente medida até o momento da entrada do BC1 no sistema elétrico.

Figura 20 – Correntes do BC1 para o caso 1.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

No momento do chaveamento verifica-se uma corrente transitória no BC1 com um pico de 1034,1A na fase B e, após o amortecimento do sistema, percebe-se uma corrente retorno a um patamar de 580 A.

O Quadro 8 apresenta os valores das correntes no BC1 para o chaveamento isolado a 0° no instante em que o BC1 foi energizado.

Quadro 8 – Correntes com banco de capacitor BC1 chaveado a 0° , caso 1.

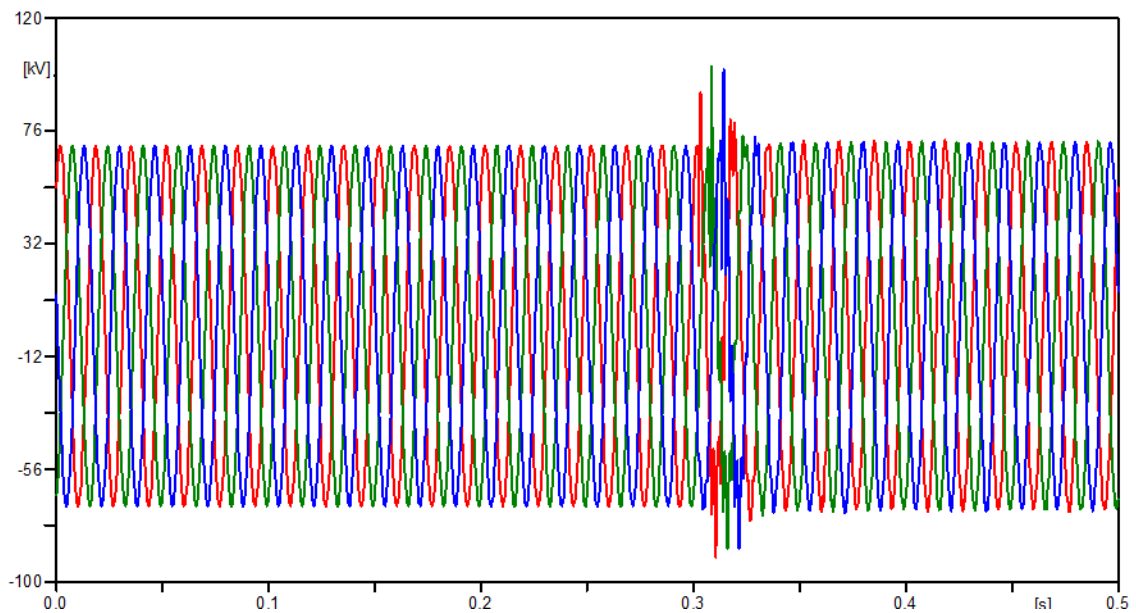
Barramento	FASE A		FASE B		FASE C	
	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)
88 kV	1033,8	0,20676	1034,1	0,21171	758,2	0,21691

Fonte: Autoria Própria.

5.3 ANÁLISE DO CASO 2

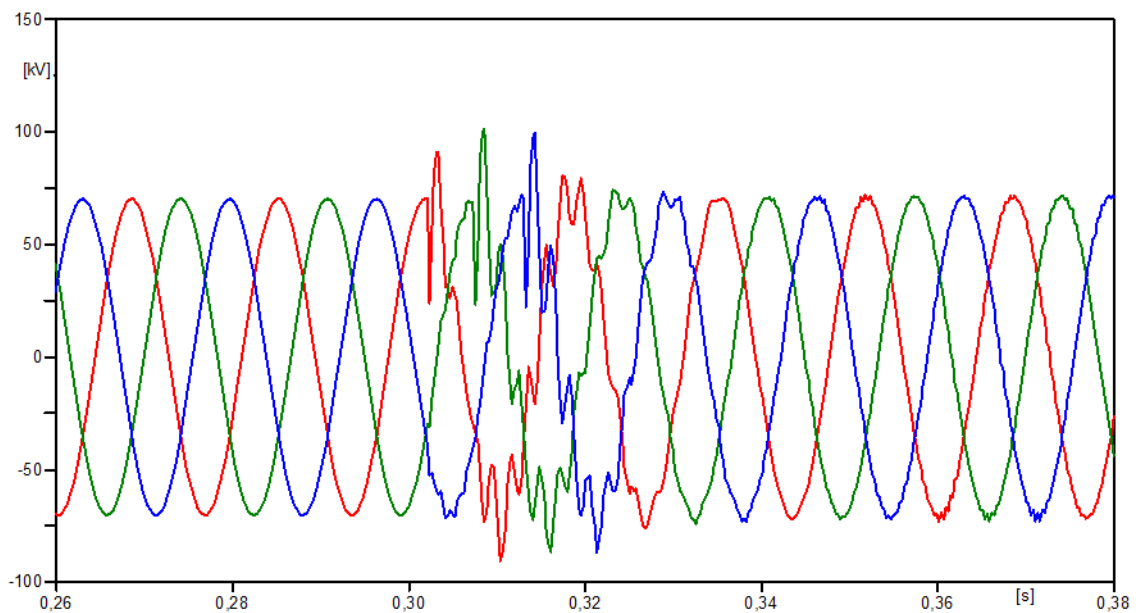
Este caso, Figuras 21 e 22, simula uma situação de chaveamento a 90° de um único banco de capacitores (BC1), estando o banco BC2 desligado.

Figura 21 – Sinal trifásico das tensões do caso 2.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Figura 22 – Zoom do Sinal trifásico das tensões do caso 2.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Observando as Figuras 21 e 22, verifica-se que esta condição de chaveamento apresenta elevadas sobretensões transitórias no local de medição. Isto ocorre pelo fato do banco ser energizado no instante em que a tensão de cada fase está passando pelo seu valor máximo (90°). O Quadro 9 apresenta os valores das tensões de pico para as três fases.

Quadro 9 - Tensões no barramento de 88 kV, caso 2.

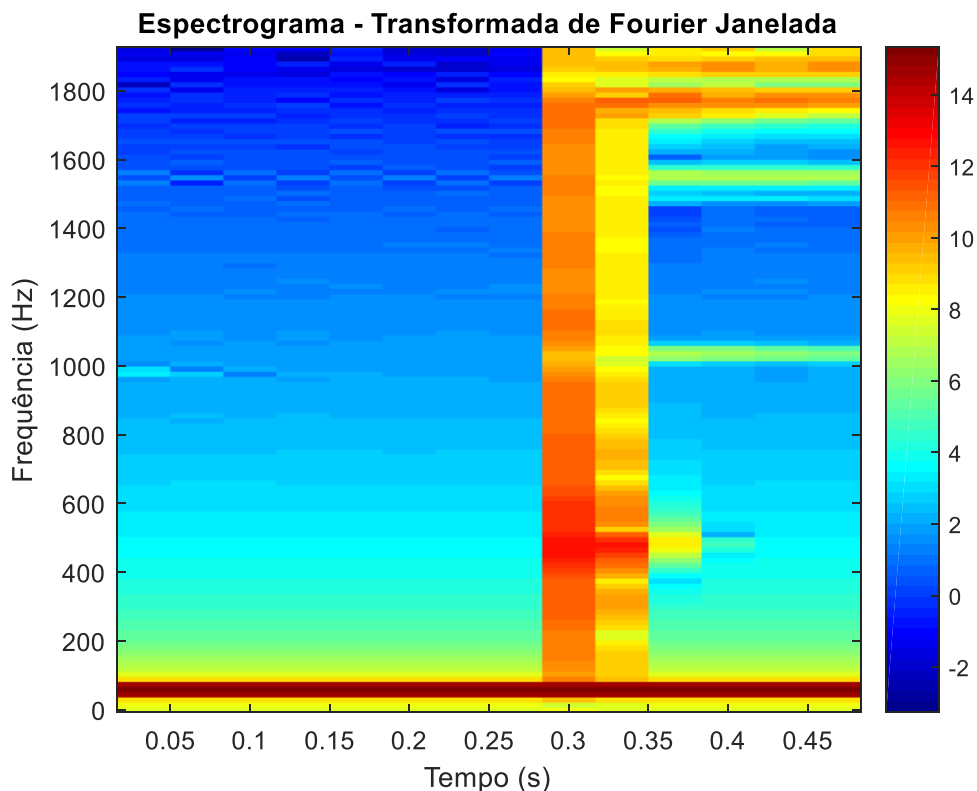
Barramento	FASE A			FASE B			FASE C		
	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)
88 kV	90,809	0,3031	1,293	101,330	0,3085	1,443	99,768	0,3143	1,421
Aumento em relação ao caso base	29,30%			44,30%			42,10%		

Fonte: Autoria Própria.

Este caso apresenta uma maior sobretensão nas fases A, B e C do barramento medido, comparando com o caso anterior. Verifica-se que o chaveamento de um banco de capacitor isolado a 90° resultou em pico de tensão com o valor de 1,443 pu.

Em seguida, através da função *spectrogram*, Figura 23, foram obtidas a representação da energia do sinal de um chaveamento a 90°, e a seguir, será demonstrado o comportamento de tal distúrbio para a fase B.

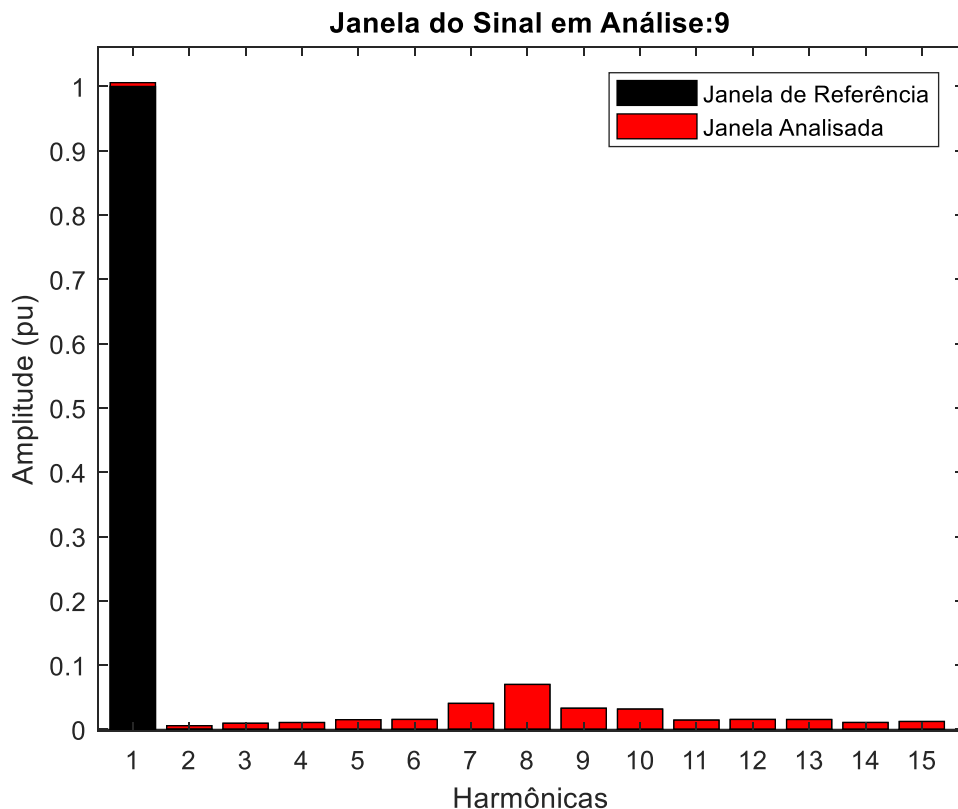
Figura 23 – Espectrograma resultante do caso 2.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Analisando as informações nos domínios do tempo e frequência da Figura 23, pode-se perceber que há uma maior concentração de energia na frequência de 60 Hz e, observa-se também, uma maior concentração de energia dos distúrbios na janela 9, com seus respectivos conteúdos de frequências entre 420 a 600 Hz, na faixa correspondente ao tempo, tem-se o momento de início do distúrbio em torno de 0,3s. A seguir são mostradas as magnitudes normalizadas da Janela 9 da fase B.

Figura 24 – Harmônicos da Janela 9 do sinal em análise.

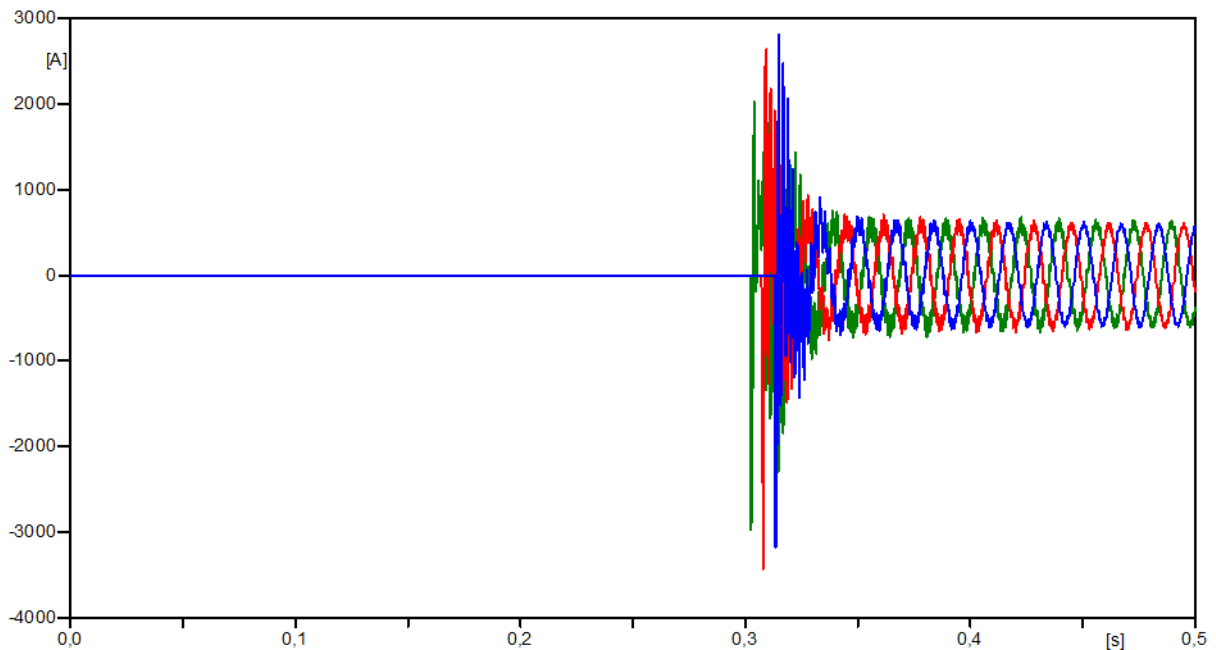


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Observa-se que em comparação com o caso 1, as magnitudes do caso 2 são maiores devido ao chaveamento ser na pior condição (90°). Esse caso, apresenta uma magnitude de 1,015 pu, em seu pico máximo, na frequência de 60 Hz, e uma maior concentração de energia nas faixas entre 7^a à 10^a harmônicas.

O comportamento da corrente no BC1 pode ser observado na Figura 25, onde se percebe uma ausência de corrente medida até o momento da entrada do BC1 no sistema elétrico, como no caso anterior.

Figura 25 – Correntes do BC1 para o caso 2



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

O Quadro 10 apresenta os valores das correntes no BC1 para o chaveamento isolado a 90°

Quadro 10 – Correntes com banco de capacitor BC1 chaveado a 90° , caso 2.

Barramento	FASE A		FASE B		FASE C	
	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)
88 kV	2032,4	0,30389	2410,9	0,30883	2815,5	0,31482

Fonte: Autoria Própria.

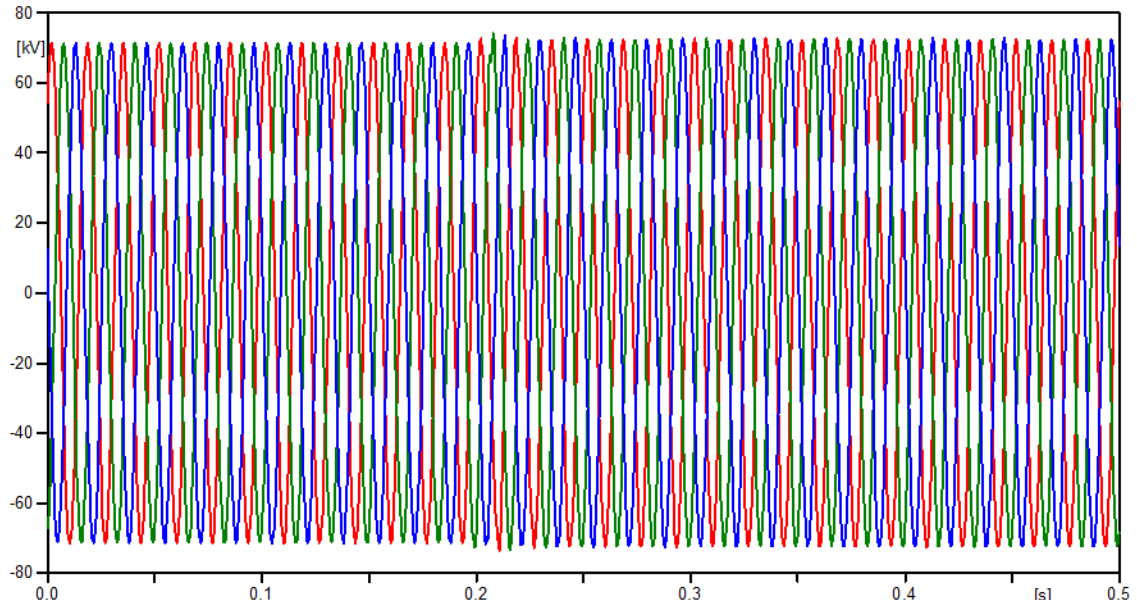
No momento do chaveamento verifica-se uma corrente transitória no BC1 com um pico de 2410,9 A na fase B e, após o amortecimento do sistema, percebe-se uma corrente entorno de 576 A.

5.4 ANÁLISE DO CASO 3

Considera-se neste caso a condição de chaveamento a 0° do banco de capacitores BC2, com o BC1 fixo no sistema. Esta condição representa a situação da manobra de banco de capacitores em contraposição (*back to back*). Sabe-se que essa configuração possibilita o surgimento de elevadas sobrecorrentes transitórias no circuito.

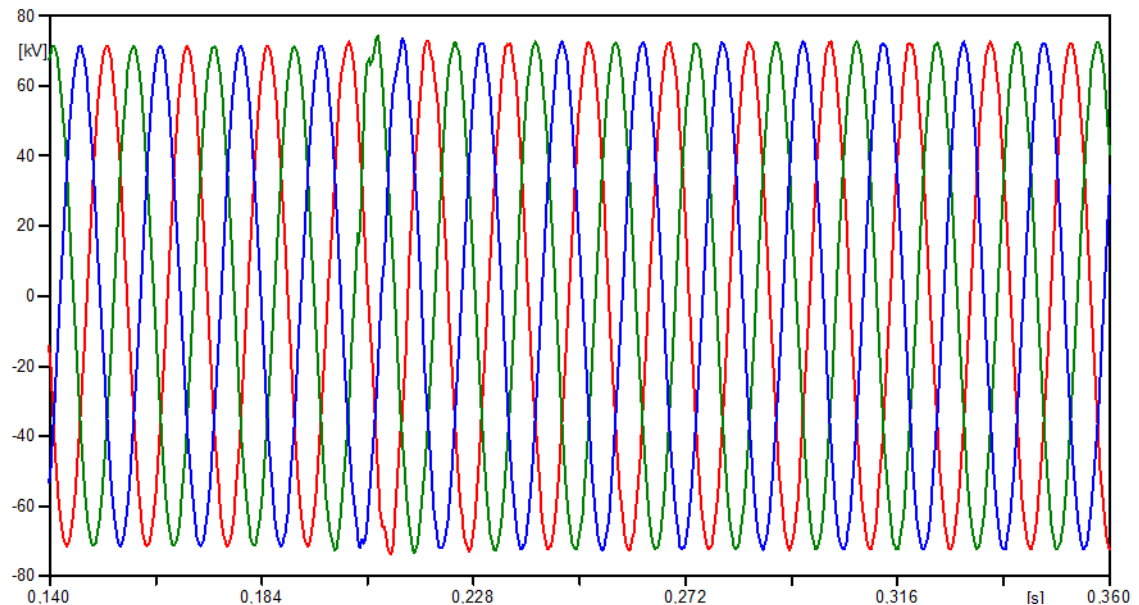
As tensões resultantes do chaveamento do banco BC2 instalado no barramento da subestação, estando o banco de capacitores BC1 fixo no circuito, podem ser analisadas pelas das Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Sinal trifásico das tensões do caso 3.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Figura 27 – Zoom do sinal trifásico das tensões do caso 3.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

O Quadro 11 apresenta os valores das tensões no barramento de 88 kV originados devido o chaveamento *back to back* a 0°.

Quadro 11 - Tensões no barramento de 88kV, caso 3.

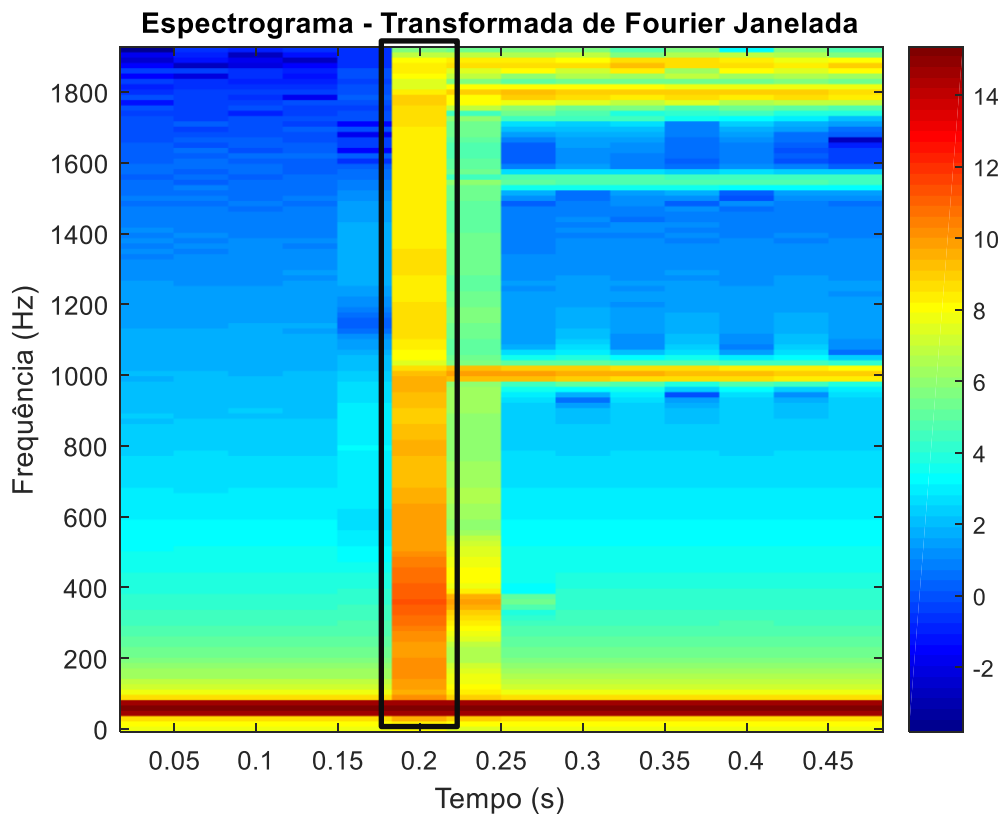
Barramento	FASE A			FASE B			FASE C		
	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>Vpico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)
88 kV	72,738	0,2021	1,035	74,184	0,2081	1,057	73,777	0,2133	1,050
Aumento em relação ao caso base	3,50%			5,70%			5,00%		

Fonte: Aatoria Própria.

Verifica-se que o chaveamento de um banco de capacitor isolado a 90° resultou em pico de tensão com o valor de 1,057 pu na fase B. Em comparação com o caso de chaveamento isolado, também chaveado a 0°, no qual apresentou uma tensão de 1,121 pu, percebe-se que o chaveamento de banco de capacitores na configuração *back to back* não gera grandes variações de tensão, uma vez que a troca maior de energia acontece apenas entre os bancos. Deste modo, a circulação de corrente através dos barramentos não introduz sobretensões elevadas no sistema (ZANETTA JÚNIOR, 2003). Porém, esse tipo de chaveamento pode acarretar em excessivas correntes de energização (correntes inrush), como poderá ser observado nas Figuras 30 e 31.

Através da função spectrogram foi obtida a representação da energia do sinal de um chaveamento *back to back* a 0°, para análise do comportamento de tal distúrbio na fase B que será representada na Figura 30.

Figura 28 – Espectrograma resultante do caso 3.

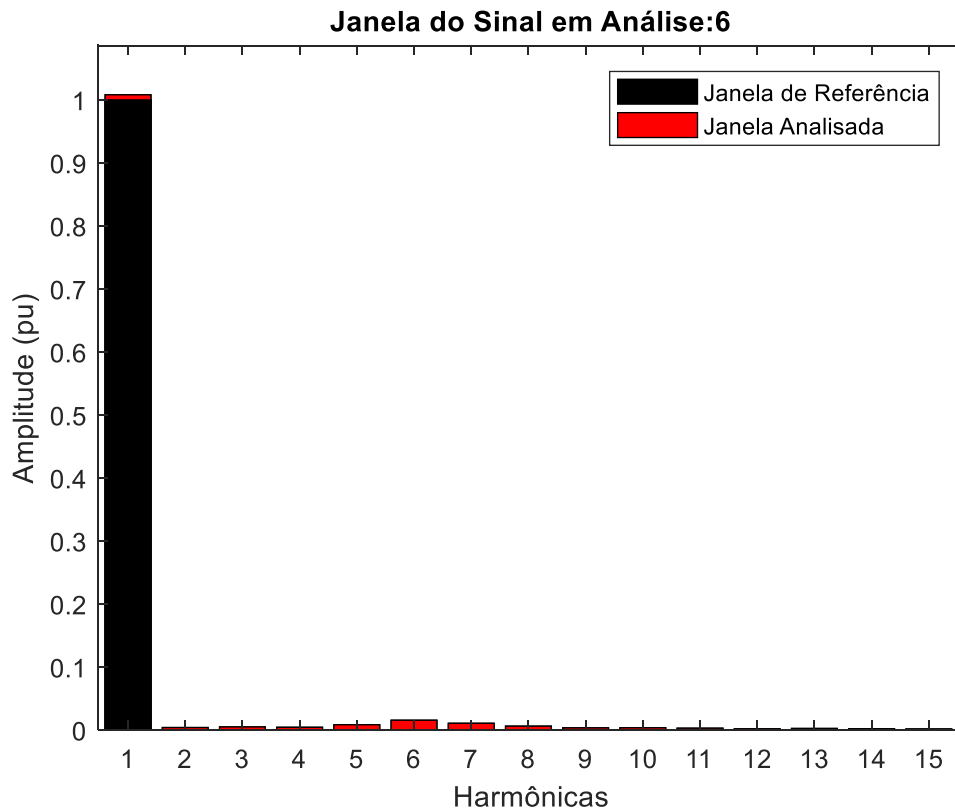


Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Analisando a Figura 28, observa-se uma constante concentração de energia em torno da frequência de 60 Hz. Uma concentração maior de energia pode ser encontrada na janela 6, Figura 29, com seus respectivos conteúdos de frequências entorno de 360 Hz e na faixa correspondente ao tempo entorno de 0,2s, podendo indicar uma característica do momento inicial do distúrbio.

Essas energias foram normalizadas e a Figura 29 traz uma visualização da características do chaveamento em análise em relação a faixa de frequência (harmônicos).

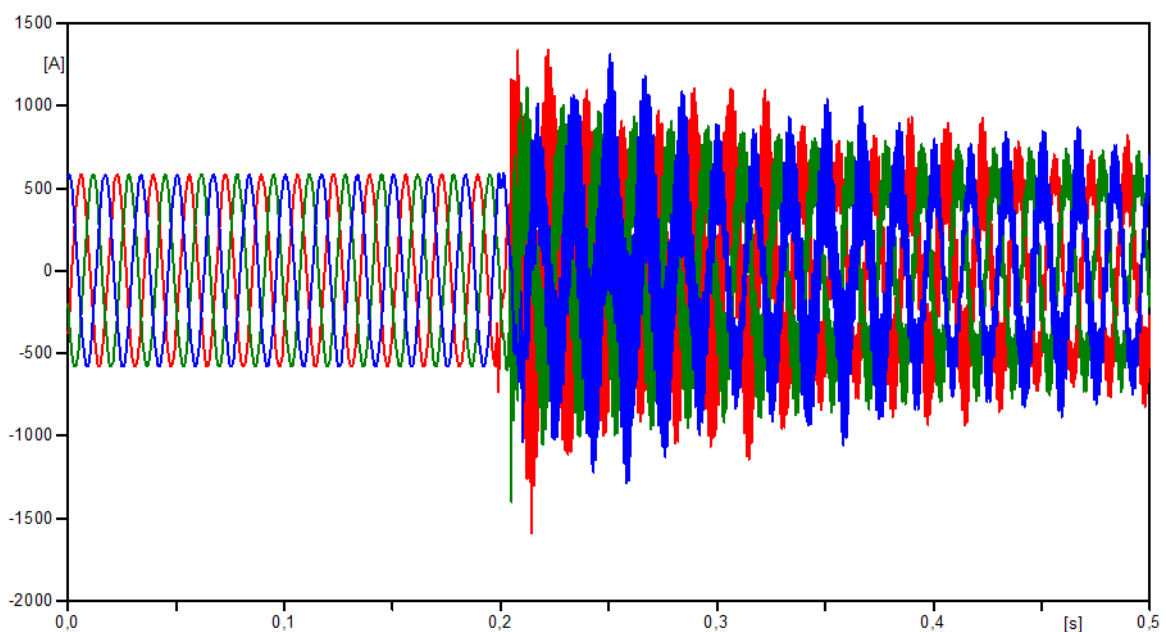
Figura 29 – Harmônicos da Janela 6 do sinal em análise.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

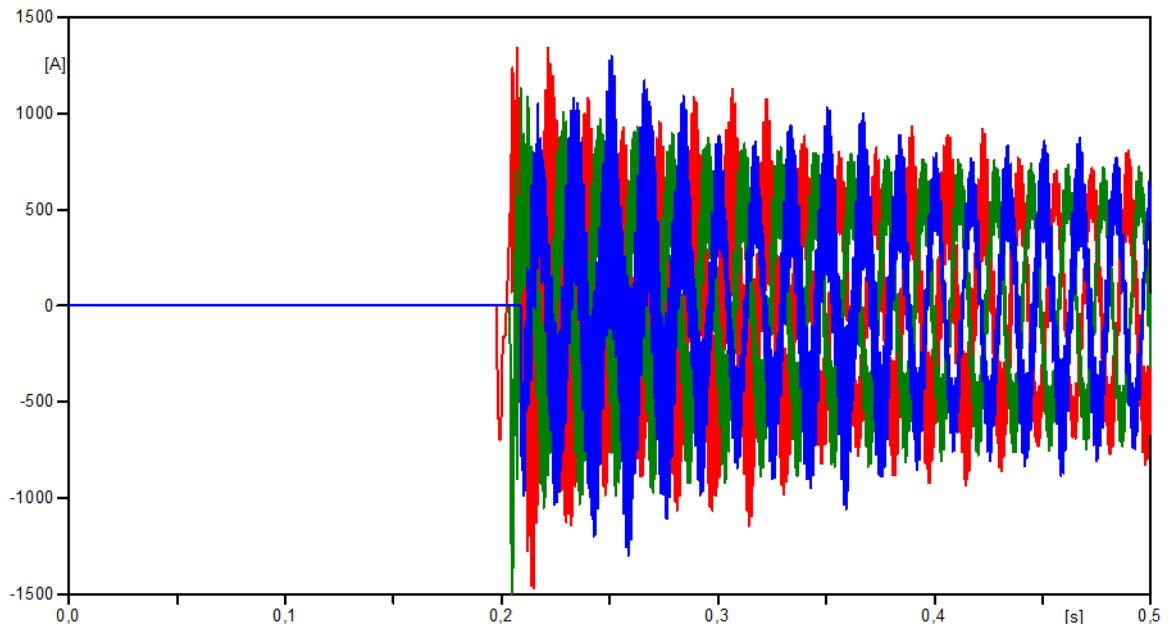
Esse caso de chaveamento, *back to back*, apresenta uma concentração de energia nas faixas entre 5^a à 7^a harmônicas (300 à 420 Hz). O comportamento das correntes no BC1 e BC2 pode ser observado nas Figuras 30 e 31, respectivamente.

Figura 30 – Correntes do BC1 para o caso 3



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Figura 31 – Correntes do BC2 para o caso 3



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Neste chaveamento em análise um banco de capacitor (BC1) já estava em operação enquanto o segundo BC2 encontrava-se desligado, portanto, já havia uma corrente nominal antes do chaveamento do BC2. O quadro a seguir, apresenta os valores de picos de corrente e seus respectivos tempos de medição para o banco BC2.

Quadro 12 – Correntes com banco de capacitor BC2 chaveado a 0°, o caso 3.

Barramento	FASE A		FASE B		FASE C	
	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)
88kV	1334,2	0,20728	1128,4	0,20884	1295	0,25103

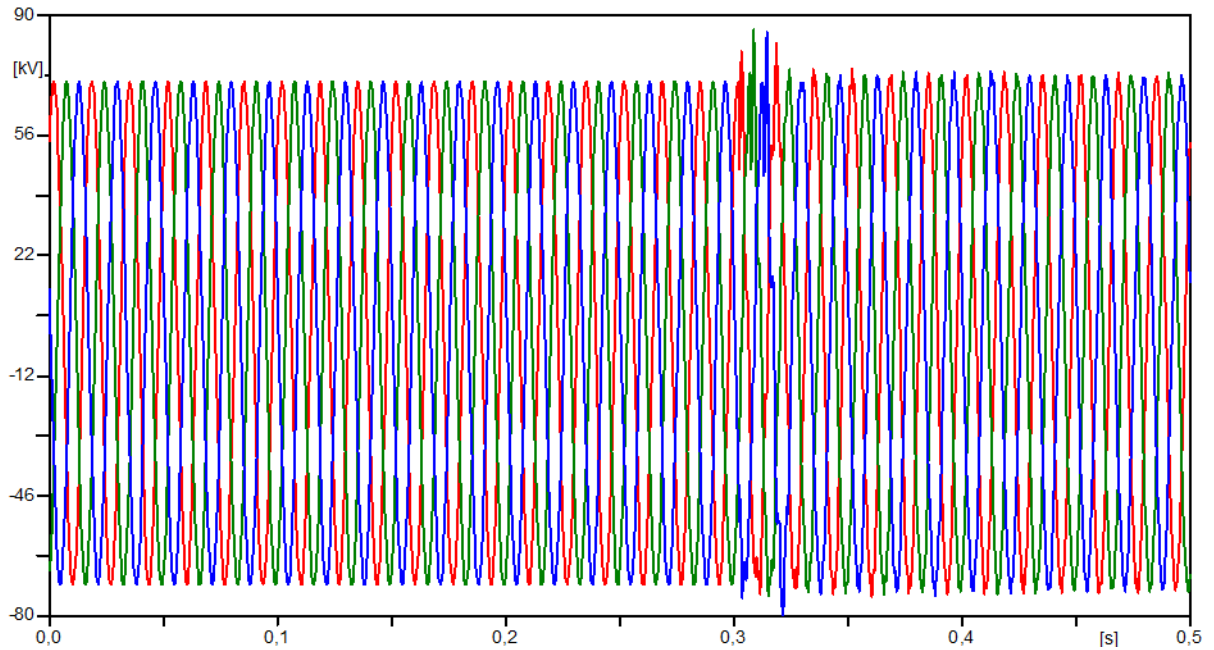
Fonte: Autoria Própria

No momento do chaveamento verifica-se uma corrente transitória no BC1 com um pico de 1128,4 A na fase B. O valor da corrente no momento do chaveamento é alto, mesmo sendo realizado a 0°.

5.5 ANÁLISE DO CASO 4

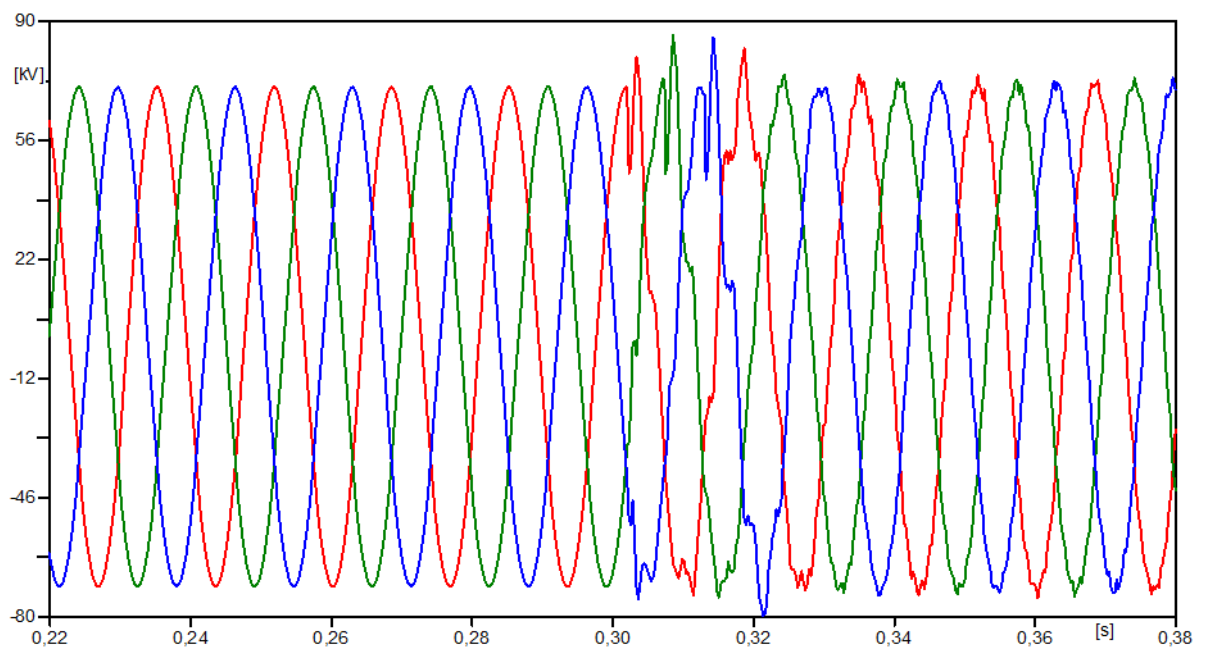
Considera-se neste caso a condição de chaveamento a 90° do banco de capacitores BC2, com o BC1 fixo no sistema, Figuras 32 e 33. Esta condição representa a pior situação da manobra de banco de capacitores (*back to back*).

Figura 32 - Sinal trifásico das tensões do caso 4.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

Figura 33 – Zoom do sinal trifásico das tensões do caso 4.



Fonte: Autoria Própria - software ATPDraw.

O Quadro 13 apresenta os valores das tensões no barramento de 88kV originados devido o chaveamento a 90° (*Back to back*).

Quadro 13 - Tensões no barramento de 88 kV, caso 4.

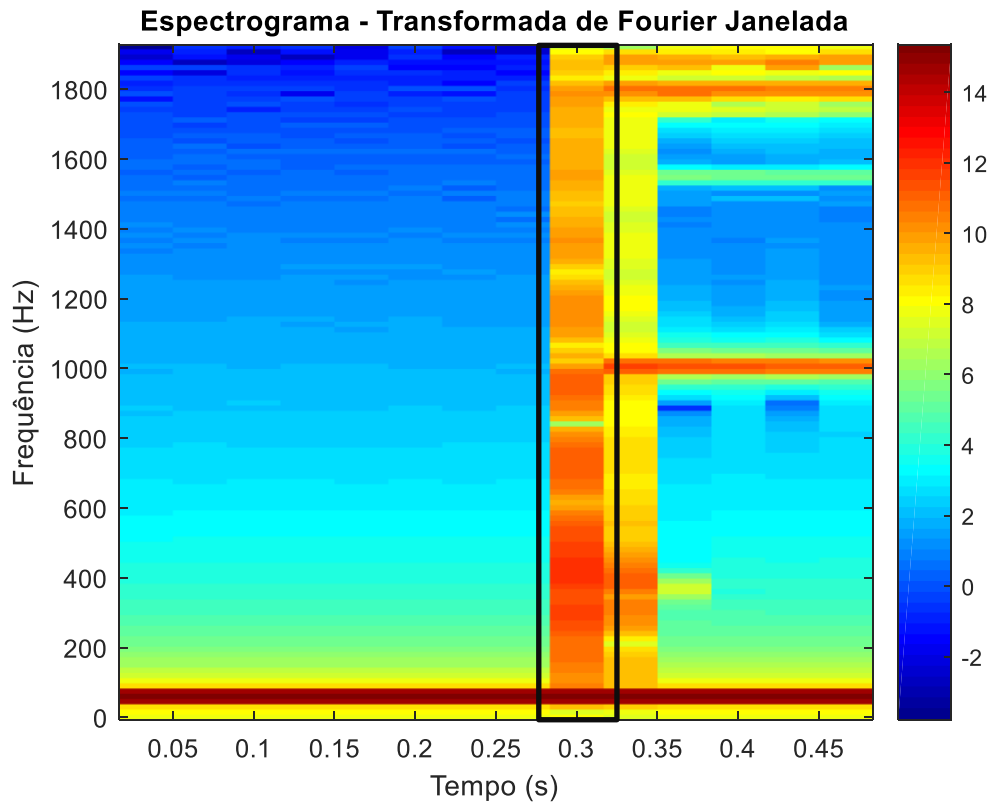
Barramento	FASE A			FASE B			FASE C		
	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)	<i>V pico</i> (kV)	Tempo (s)	<i>V pico</i> (pu)
88 kV	82,219	0,3085	1,171	85,876	0,3143	1,224	85,394	0,3187	1,216
Aumento da tensão em relação ao caso base	17,10%			22,40%			21,60%		

Fonte: Aatoria Própria.

Pode-se observar que devido o chaveamento ocorrer aproximadamente no instante de máxima tensão nas fases A, B e C, a magnitude das tensões transitórias são mais elevadas em relação ao caso 3.

Verifica-se que o chaveamento *back to back* a 90° resultou em pico de tensão de 1,224 pu na fase B. Em comparação com o caso de chaveamento isolado também chaveado a 90° que resultou em uma tensão de 1,443 pu, percebe-se que este tipo de chaveamento não geram grandes variações de tensão.

Com a função spectrogram obteve-se a representação da energia do sinal de um chaveamento *back to back* a 90°, que será mostrada na Figura 34, para análise do comportamento do sinal de tensão na fase B.

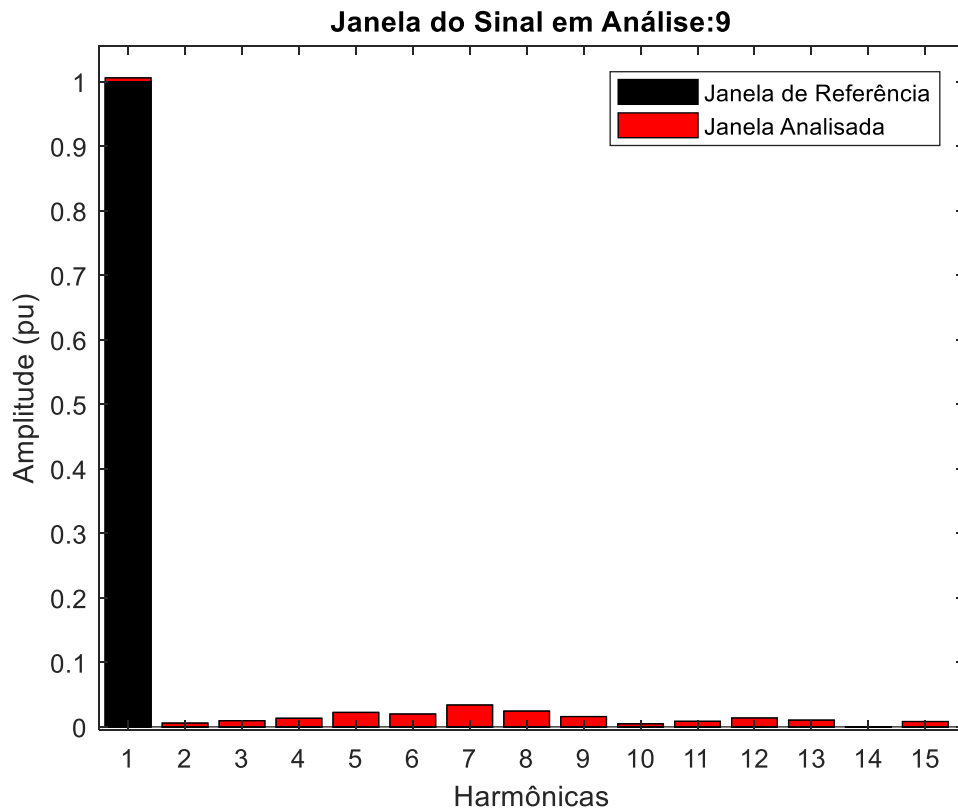
Figura 34 – Espectrograma do sinal resultante do caso 4.

Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Percebe-se que há uma maior concentração de energia na faixa correspondente ao tempo entorno de 0,3s, onde acontece o momento inicial do chaveamento. É possível observar também, uma concentração maior de energia do distúrbio em seus conteúdos de frequências entre 300 a 1000 Hz.

As energias encontradas através da função spectrogram foram normalizadas e a Figura 35 traz uma visualização da faixa de frequência características desse caso de análise.

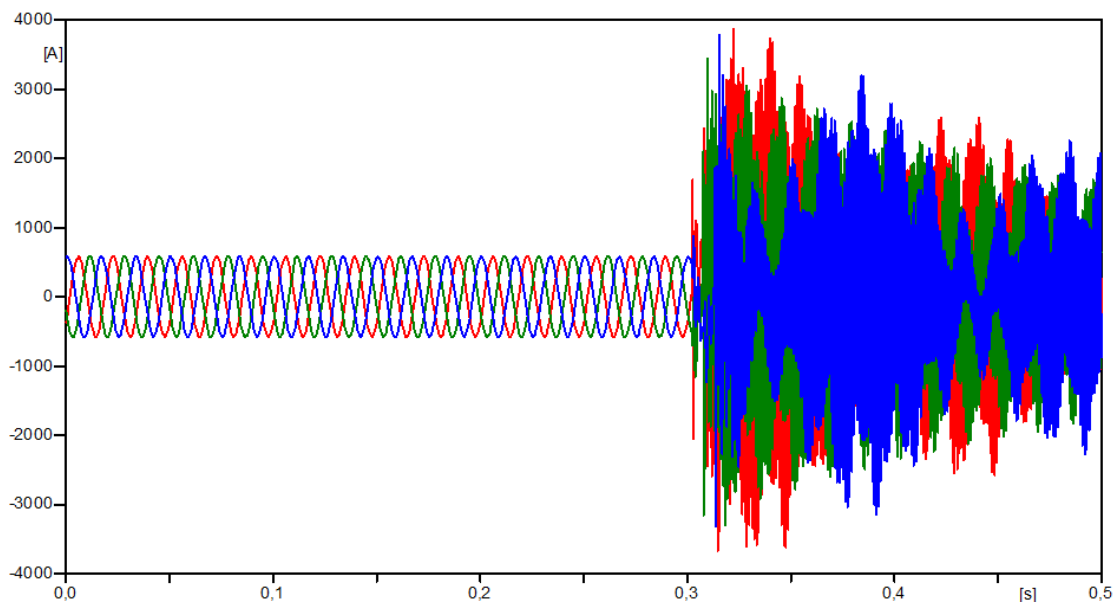
Figura 35 – Harmônicos da Janela 9 do sinal em análise.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

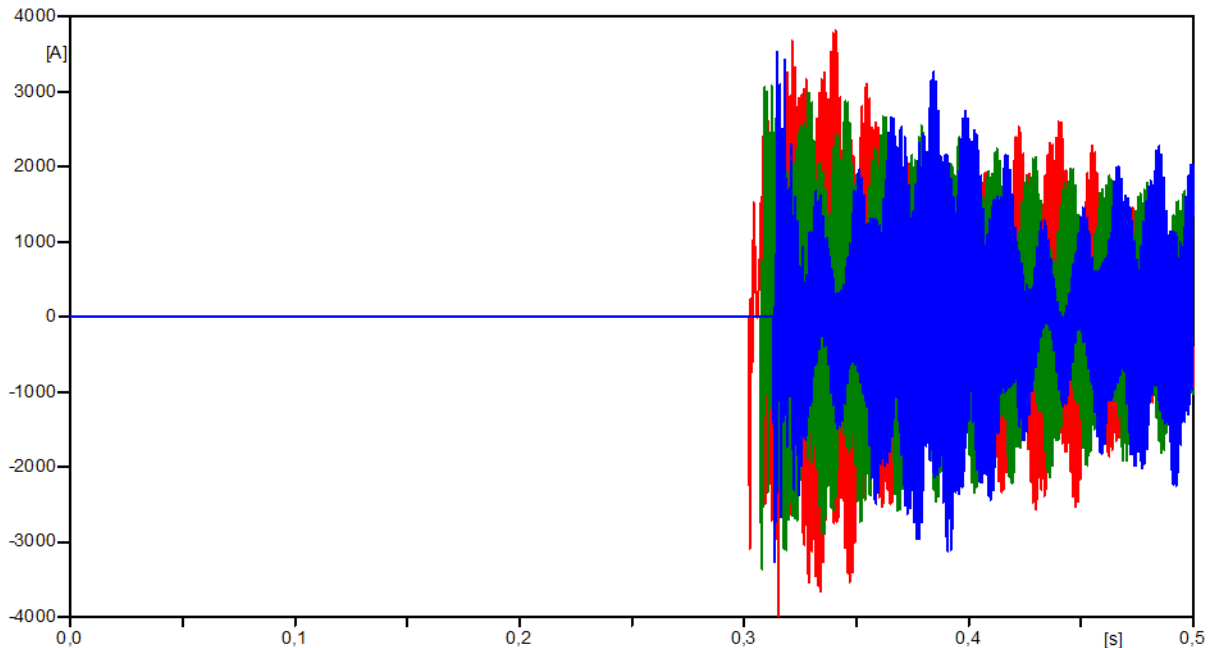
Esse caso de chaveamento, *back to back*, apresenta uma concentração de energia nas faixas entre a 4^a à 9^a harmônicas (240 à 540 Hz). Pode-se observar também, Figuras 36 e 37, o comportamento das correntes no BC1 e BC2, no momento em que o banco foi energizado a 90°.

Figura 36 – Correntes do BC1 para o caso 4.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

Figura 37 – Correntes do BC2 para o caso 4.



Fonte: Autoria Própria - software MATLAB.

No quadro a seguir, estão os valores de picos e seus respectivos tempos de medição para o banco BC2.

Quadro 14 – Correntes com banco de capacitor BC2 chaveado a 90°, caso 4.

Barramento	FASE A		FASE B		FASE C	
	<i>I</i> pico (A)	Tempo (s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)	<i>I</i> pico (A)	Tempo(s)
88 kV	3865	0,32211	3450,1	0,30962	3785,1	0,31534

Fonte: Autoria Própria.

Analisando as Figuras 36 e 37 e o quadro anterior, pode-se concluir quanto às sobrecorrentes que nos casos de energização a 90° de um banco de capacitores na configuração *back to back* ocorrem as maiores sobrecorrentes transitórias, procedentes da descarga do banco de capacitores (BC1) já energizado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram analisados, através de simulações no *software* ATP, transitórios em sinais de tensão e corrente originados pelo chaveamento de banco de capacitores, constatando a influência de alguns parâmetros no comportamento destas simulações como o tipo de chaveamento e o instante em que é realizado o chaveamento do banco de capacitores. Destaca-se ainda, que o sistema elétrico simulado é real e, portanto, representa o comportamento dos sinais transitórios muito próximos àqueles encontrados em campo.

Ao se inserir o banco de capacitores em um sistema elétrico, busca-se melhorar o perfil de tensão da região que o mesmo se encontra. Analisando o barramento de 88kV (caso base), observou-se que o perfil de tensão no barramento opera em valores abaixo da tensão nominal, com os bancos de capacitores desligados. Após os chaveamentos verificou-se uma melhora no perfil de tensão do barramento de 88kV, importantíssimo para o atendimento às cargas conectadas a este barramento.

Fazendo a comparação entre os casos 1 e 2, chaveamento isolado a 0° e 90°, e chaveamento *back to back* a 0° e 90°, pode-se dizer que o chaveamento a 90° implica em transitórios maiores do que o chaveamento a 0°, pelo chaveamento ocorrer no ponto máximo de tensão do sistema.

Nos casos 3 e 4, configuração *back to back*, observou-se que as tensões de pico são menores em relação ao chaveamento isolado de um banco de capacitores, porém esse tipo de chaveamento gerou altas correntes nos BC1 e BC2.

Por fim, ao analisar os espectrogramas e as magnitudes de cada caso apresentado nesse trabalho, pôde-se observar que as manobras de banco de capacitores, resultam em oscilações de tensão com frequência entre 300 a 900 Hz, sendo a 8ª harmônica (480 HZ) aquela que mais se destacou nas análises. A tensão de pico com magnitude entre 1,12 a 1,44 pu, chegando bem próximo à teoria apresentada por DUNGAN.

Acredita-se que o objetivo deste trabalho deste Trabalho de Conclusão foi alcançado, uma vez que todas as simulações e as análises propostas foram realizadas com sucesso, tendo os resultados apresentados ao longo deste trabalho.

Destaca-se como ganho durante a realização deste trabalho, o contato com ferramentas de simulação (ATPDraw) e análise computacional (Matlab), o que possibilitou uma melhor visão a respeito do comportamento do sistema elétrico de potência em relação às manobras de banco de capacitores.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Resolução Normativa N°424 de dezembro de 2010.** <http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2010424.pdf>

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5282 - Capacitores de Potencia Em Derivação Acima de 1kv.** Rio de Janeiro, 1998.

CAMPOS, Ricardo C.; D'AJUZ, Ary. **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas.** Cap13-Capacitores em Derivação Goya Editora LTDA. Brasília, 2013.

CAÑIZARES, Claudio. **Sistemas de energia elétrica: análise e operação.** 2011. Manual de introdução. Alstom, 2015.

CARVALHO, Tulio Charles de Oliveira. **Análise e Implementação de métodos aplicados aos sinais variantes no tempo presentes em sistemas elétricos de potência.** Tese de doutorado (Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CORRÊA, Felipe I. M. **Estudo de um sistema de distribuição com enfoque na qualidade da energia elétrica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia São Carlos. 2007

DAHLKE, Diogo B. **Ajuste de capacitores automáticos via fluxo de potência ótimo parametrizado.** Dissertação de Mestrado Engenharia Elétrica – PPGE, Departamento de Engenharia Elétrica, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná. Ago.2010

DANTAS, Karcus Marcelus C., DE MOURA, Danielly Formiga P., JUNIOR, Damásio F. e NEVES, Washington L. A. **Estudo de surtos decorrentes de manobras em bancos de capacitores – Procedimentos computacionais e medidas mitigadoras** In: IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, Goiânia-GO, 2010.

D'AJUZ, Ary. **Equipamentos Elétricos – especificação e aplicação em alta tensão.** Rio de Janeiro, FURNAS 1985.

DE CAMPOS, Anderson P.; GIOVANIGUESSI, Cirilo. **Transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico de potência.** Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica). Faculdades Unificadas da Fundação Educacional de Barretos. Barretos, São Paulo. 2005.

DE SOUZA, Silvio A. **Utilização da transformada de Fourier janelada para caracterização de distúrbios na qualidade da energia elétrica.** Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica). Universidade Federal de São Carlos. 2004.

DINIZ, Henrique Eduardo P. **Termografia quantitativa como ferramenta de gestão de ativos do sistema elétrico de potência.** Dissertação Pós-graduação UFMG. Belo Horizonte, 2013.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. - 2ed. New York, McGraw-Hill, 2003

FRAGOAS, Alexandre Gracioli. **Estudo de casos do uso de bancos de capacitores em uma rede de distribuição primária – indicativos da sua viabilidade econômica**. Trabalho de Conclusão de Curso. (Engenharia Elétrica) Escola de Engenharia São Carlos, da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2008.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60871-1 Shunt capacitors for a AC. power systems having a rated voltage above 1 000 V - Part 1: General**. 2014

IEEE STANDARDS ASSOCIATION. **IEEE Std 18 Shunt Power Capacitors. (Revision of IEEE Std 18- 2002)**. 2012

JARAMILLO, S.H. et al. **Discussion on “Power quality indices for aperiodic voltage and currents” Power Delivery**, IEEE Transactions on , Volume: 15 Issue: 4 , Oct. 2000.

LUCHINI, Octávio M. **Análise da correção de tensão em circuitos secundários de bt em anel usando capacitores**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

MAMEDE, João F. **Manual de equipamentos elétricos**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

MILLER, Robert H. **Operação de sistemas de potência**. Tradução e revisão técnica Eletrobrás. São Paulo: McGraw-Hill, Rio de Janeiro: Eletrobrás, 1987.

MISITI, M. et al. **Wavelet Toolbox: User’s Guide**. Natick, MA. 1997

NATARAJAN, R. **Power System Capacitors**. 2005.

Operador Nacional do Sistema Elétrico - **ONS**. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/biblioteca_virtual/publicacoes/dados_relevantes_2013/html/04-01-Integracao-Eletoenergetica.html?expanddiv=04,05sub01>

PEREIRA, Marco Polo. **Introdução ao ATP (Alternative Transients Program)**. Revista Iberoamericana del ATP. Rio de Janeiro, Mar.1998.

PORTNOFF, M. **Time-frequency representation of digital signals and systems based on short-time Fourier analysis Acoustics, Speech, and Signal**, IEEE Transactions on, Volume: 28 Issue: 1, Feb. 1980.

SCHWARZ, Marcos B.; MORAIS, Sérgio de Azevedo. **Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas**. Cap12 - Disjuntores. Goya Editora LTDA. Brasília, 2013.

ZANETTA JUNIOR, Luiz Cera. **Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.