

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

HARYSSON DE MORAES APARECIDO

**ESTUDO E ANÁLISE DO IMPACTO DE ALOCAÇÕES DE FILTROS PASSIVOS
EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

HARYSSON DE MORAES APARECIDO

**ESTUDO E ANÁLISE DO IMPACTO DE ALOCAÇÕES DE FILTROS PASSIVOS
EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso, 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. Murilo da Silva.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2020

FOLHA DE APROVAÇÃO

Harysson de Moraes Aparecido

ESTUDO E ANÁLISE DO IMPACTO DE ALOCAÇÕES DE FILTROS PASSIVOS EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 19/11/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Marcelo Favoretto Castoldi - (Membro)

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

Dedico este trabalho ao meu Aba Pai, ao meu Senhor Jesus Cristo e ao meu amigo Espírito Santo, pois eles continuamente me provêm abundantemente em tudo. Aos meus familiares que forneceram o apoio e o subsídio essencial; e, aos meus amigos, que me fortaleceram me abençoando com suas amizades genuínas.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que foram meus professores durante a graduação e aos profissionais dos diferentes departamentos que auxiliam os discentes prestando um serviço profissional com excelência e de alta qualidade. Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus de Cornélio Procópio, a qual considero um dos meus lugares preferidos, no qual convivi importantes anos da minha vida, pois realizei tanto o técnico em eletrotécnica e agora a graduação em engenharia elétrica. Agradeço ao professor doutor Murilo da Silva, que me facilitou o entendimento nas disciplinas de circuitos elétricos e qualidade de energia, além disso, aceitou o desafio de ser o meu professor orientador do trabalho de conclusão de curso, tornando possível o êxito do mesmo graças às suas orientações, ensinamentos e empatia.

“Tenho a audácia de acreditar que os povos em todos os lugares podem fazer três refeições por dia para seus corpos, ter educação e cultura para suas mentes e dignidade, igualdade e liberdade para seus espíritos.”

Martin Luther King Jr.

RESUMO

APARECIDO, Harysson de Moraes. **Estudo e Análise do Impacto de Alocações de Filtros Passivos em um Sistema De Distribuição De Energia Elétrica**. 2020. 125f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

A demanda mundial por energia elétrica é enorme e aumenta a cada ano, diante disso, deve-se aumentar os estudos e as aplicações de melhorias viáveis que garantam a qualidade da energia elétrica fornecida, pois é evidente o aumento significativo da presença de equipamentos eletrônicos em residências, comércios e indústrias. Diante da enorme diversidade de perfis de cargas dos consumidores há as cargas não lineares que injetam correntes harmônicas nas redes de distribuição de energia elétrica e, conseqüentemente, provocam distúrbios como a distorção da forma de onda das tensões e das correntes elétricas fornecidas aos consumidores. Tais distorções provocadas pelas correntes harmônicas impactam em investimentos com a finalidade de mitigação, portanto, com base nisso, o principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar o impacto da alocação de filtros harmônicos passivos frente à distorção harmônica em um sistema de distribuição de energia elétrica, tendo como parâmetros de restrição os limites impostos pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Desse modo, os resultados apresentados enfatizam a importância do dimensionamento e da alocação adequada dos filtros, pois estes quando instalados em diferentes barramentos do sistema apresentaram cenários diferentes quanto à mitigação harmônica, seja ela do ponto de vista local e, principalmente do ponto de vista sistêmico.

Palavras Chaves: Harmônicas, Filtros Passivos, Qualidade de Energia Elétrica.

ABSTRACT

APARECIDO, Harysson de Moraes. **Study and Analysis of the Impact of Passive Filter Allocations in an Electric Power Distribution System**. 2020. 125f. Graduation Work - Electrical Engineering. Federal Technological University of Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

The worldwide demand for electric energy is huge and increases every year. In view of this, studies and applications for viable improvements that guarantee the quality of the electric energy supplied must be increased, as it is evident the significant increase in the presence of electronic equipment in homes, businesses and industries. In view of the enormous diversity of consumer load profiles, there are non-linear loads that inject harmonic currents into the electricity distribution networks and, consequently, cause disturbances such as the distortion of the waveform of voltages and electrical currents supplied to consumers. Such distortions caused by harmonic currents impact investments with the purpose of mitigation, therefore, based on this, the main objective of this course conclusion work is to analyze the impact of the allocation of passive harmonic filters in the face of harmonic distortion in a distribution system. electricity, having as limits the limits imposed by the National Electric Energy Agency - ANEEL. In this way, the results presented emphasize the importance of sizing and proper allocation of filters, because when installed on different system buses, they presented different scenarios regarding harmonic mitigation, be it from a local point of view and, mainly from a systemic point of view. .

Keywords: Harmonic, Passive Filters, Power Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forma de Onda Senoidal sem Distúrbios Harmônicos	18
Figura 2 - Banco de Capacitores em Rack Metálico	19
Figura 3 - Forma de Onda de Tensão Distorcida	22
Figura 4 - Forma Onda de Corrente Distorcida	22
Figura 5 - Componentes Harmônicas da Corrente	22
Figura 6 - Triângulo de Potências Fundamentais.....	29
Figura 7 - Classes de Consumidores	32
Figura 8 - Circuito Ressonante em Série	37
Figura 9 - Amplitude da corrente versus frequência,	38
Figura 10 - Relação entre Fator de Qualidade e Banda	40
Figura 11 - Banco de Reatores (indutores de dessintonia)	41
Figura 12 – Topologia Filtro Passivo Sintonizado Simples.....	43
Figura 13 - Exemplar Real Filtro Sintonizado	43
Figura 14 - Tipos de filtros passivos passa-alta ou Amortecido:	44
Figura 15 - Exemplar Real de Filtros Passivos Passa-Alta ou Amortecido	45
Figura 16 - Filtros Passivos em Série.....	46
Figura 17 - Filtros Passivos em Derivação	46
Figura 18 - Alimentador Teste 13 barras IEEE.....	51
Figura 19 - Sistema Teste de Distribuição de 13 Barramentos Desbalanceados Modelado.....	52
Figura 20 - Fluxograma das Etapas do Projeto	55
Figura 21 - Amplitudes das correntes da Fase A	58
Figura 22 - Amplitudes das correntes da Fase B	58
Figura 23 - Amplitudes das correntes da Fase C	58
Figura 24 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão nos Barramentos ...	64
Figura 25 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª ordem.....	65
Figura 26 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem	65
Figura 27 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem	65
Figura 28 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão	67

Figura 29 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem	67
Figura 30 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem	68
Figura 31 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem	68
Figura 32 - Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão	69
Figura 33 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem	70
Figura 34 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem	70
Figura 35 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem	70
Figura 36 - Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão	72
Figura 37 - Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem	72
Figura 38 – Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem	73
Figura 39 - Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem	73
Figura 40 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão	74
Figura 41 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem	75
Figura 42 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares não Múltiplas da 3ª ordem	75
Figura 43 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas da 3ª Ordem	75
Figura 44 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão	77
Figura 45 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem	77
Figura 46 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem	77
Figura 47 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem	78

Figura 48 - Relatório Geral.....	79
Figura 49 – Caso Base: DTC	92
Figura 50 - Caso Base: DTCl	92
Figura 51 - Caso Base: DTC3	92
Figura 52 - Caso Base: DTCP.....	92
Figura 53- Cenário 1: DTC	97
Figura 54 - Cenário 1: DTC3	97
Figura 55 - Cenário 1: DTCl	97
Figura 56 - Cenário 1: DTCP	97
Figura 57 - Cenário 2: DTC	102
Figura 58 – Cenário 2: DTC3	102
Figura 59 - Cenário 2: DTCl	102
Figura 60 - Cenário 2: DTCP	102
Figura 61 - Cenário 3: DTC	107
Figura 62 -Cenário 3: DTC3	107
Figura 63 - Cenário 3: DTCl	107
Figura 64 - Cenário 3: DTCP.....	107
Figura 65 - Cenário 4: DTC	112
Figura 66 - Cenário 4: DTC3	112
Figura 67 - Cenário 4: DTCl	112
Figura 68 - Cenário 4: DTCP.....	112
Figura 69 - Cenário 5: DTC	117
Figura 70 - Cenário 5: DTC3	117
Figura 71 - Cenário 5: DTCl	117
Figura 72 - Cenário 5: DTCP.....	117

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Capacitância
FP	Fator de Potência
L	Indutância
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
R	Resistência elétrica
RMS	Root Mean Square (Raiz Quadrada da Média dos Quadrados)
SEP(s)	Sistema(s) Elétrico(s) de Potência
SI	Sistema Internacional de Unidades
TDF	Transformada Discreta de Fourier
Y	Admitância
[A]	Ampère, unidade de medida de corrente elétrica
[C]	Coulomb, unidade de carga elétrica
[F]	Faraday, unidade de medida da capacitância
[Hz]	Hertz, unidade de medida de frequência
[J]	Joule, unidade de energia para realizar trabalho
[V]	Volt, unidade de medida da Tensão Elétrica
(X _L)	Reatância Indutiva
(X _c)	Reatância Capacitiva

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1.1	Objetivo Geral	17
2.1.2	Objetivos Específicos	17
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	Conceitos Fundamentais de Eletrônica de Potência	18
3.2	Harmônicas	21
3.2.1	Causadores de Distorções Harmônicas	21
3.2.2	Impacto das Harmônicas e suas Consequências	23
3.2.3	Grandezas Elétricas em Sistemas Não-Senoidais	24
3.3	Qualidade de Energia e Normativa Brasileira	31
3.3.1	Aspectos Legais sobre o Fator de Potência	31
3.3.2	Aspectos Legais sobre as Distorções Harmônicas	33
3.4	Filtros	36
3.4.1	Fator de Qualidade	36
3.4.2	Fator de Dessintonia	41
3.4.3	Filtros Ativos e Passivos	43
3.4.4	Configurações de Instalação dos Filtros	45
3.4.5	Projeto do Filtro	47
4	METODOLOGIA	50
4.1	Modelagem, Simulação e Extração de Dados	50
4.2	Elaboração de Algoritmo de Tratamentos de Dados	53
4.3	Projeto de Filtros	55
5	RESULTADOS	56
5.1	Análise do Caso Base	56
5.2	Estimativa dos Parâmetros Iniciais dos Filtros	57
5.3	Dimensionamento dos Componentes dos Filtros	61
5.4	Resultados dos Diferentes Cenários	64
5.4.1	Caso Base: Sistema sem Filtros	64
5.4.2	Cenário 1 - Filtros Instalados na Barra 32	67
5.4.3	Cenário 2 – Filtros Instalados na Barra 71	69
5.4.4	Cenário 3: Filtros Instalados no Barramento 75	72

5.4.5	Cenário 4: Filtros Instalados no Barramento 75 e 911	74
5.4.6	Cenário 5: Filtros Instalados no Barramento 75 (Uso do BC Existente).....	76
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	80
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
	APÊNDICE A – Dimensionamento dos Filtros	86
	APÊNDICE B – Resultados Obtidos	88
	ANEXO A – Dados e Informações do SEP Teste	118

1 INTRODUÇÃO

Um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia no ano de 2017 aponta uma perspectiva de crescimento acentuado da demanda mundial de energia elétrica até o ano de 2040 (1). Atualmente é evidente a importância do fornecimento contínuo de energia elétrica, no entanto, a relevância não está somente nesse fato, mas também, na qualidade do produto, a energia elétrica fornecida pelos sistemas elétricos de potência (SEPs). Em se tratando da garantia da qualidade de energia elétrica, tanto as concessionárias quanto os consumidores, os fabricantes de produtos eletroeletrônicos e as autoridades políticas possuem suas respectivas parcelas de responsabilidade (2).

O avanço da eletrônica de potência mudou o perfil das cargas existentes nos SEPs e contribui para a economia de energia e custos, porém o seu funcionamento de característica não linear “polui” a rede elétrica com harmônicas que distorcem as tensões e correntes (2). O aumento da presença de cargas com características não lineares nas redes de distribuição acarreta no aumento de injeções de correntes harmônicas no sistema, que ao interagir com a impedância do sistema causam distorções da forma de onda tensão e/ou corrente e problemas de qualidade de energia elétrica (QEE) (3). A deterioração da qualidade de energia elétrica compromete a eficiência e o desempenho operacional do sistema, pois as harmônicas podem interferir no controle, na comunicação e na atuação de equipamentos de proteção (4).

É comum a presença das harmônicas nos SEPs de distribuição, sendo assim, há indicadores mensuráveis que relacionam cada valor das componentes harmônicas de tensão e/ou corrente com a sua componente na frequência fundamental (5). No Brasil, a frequência fundamental é de 60 [Hz] e a entidade responsável por regulamentar as questões que envolvem a qualidade de energia elétrica é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Ela estabelece suas diretrizes por meio do documento de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, sendo que, o módulo 8 deste documento é o que trata diretamente acerca da QEE e ele encontra-se na décima edição, vigente a partir do ano de 2018.

No PRODIST - Módulo 8 (5), os cálculos dos indicadores das harmônicas são focados na tensão elétrica e são classificados da seguinte maneira: Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT); Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes pares (DTT_P) e ímpares (DTT_I) não múltiplas de 3; e, Distorção Harmônica Total de Tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT₃). Cada um desses indicadores possui suas respectivas restrições ou limites, e logicamente, a comparação do indicador com o seu respectivo limite informará a necessidade ou não de mitigação.

Dentre os diferentes métodos mais utilizados para amenizar os distúrbios harmônicos, o mais comum é o filtro passivo sintonizado, devido à sua simplicidade e custo econômico (4). Além disso, a alocação dos filtros passivos em um SEP requer uma análise do ponto de vista sistêmico e não somente pontual, porque dependendo do local de instalação pode haver o aumento de distorção harmônica em outros pontos devido a modificação do fluxo de corrente do sistema (6).

2 OBJETIVOS

Esta seção apresenta a descrição do objetivo geral e dos objetivos específicos.

2.1.1 Objetivo Geral

O principal objetivo deste trabalho de conclusão de curso é analisar sob o ponto de vista sistêmico os impactos causados pela instalação de filtros passivos em diferentes barramentos de um sistema de distribuição de energia elétrica, tendo como finalidade a adequação das taxas totais de distorções harmônicas de tensão de cada barramento em conformidade com os limites impostos no PRODIST - Módulo 8/2018.

2.1.2 Objetivos Específicos

- Utilizar o PRODIST – Módulo 8/2018 para a adequação dos resultados à norma brasileira vigente referente à qualidade de energia, especificamente, no que se trata de distorções harmônicas;
- Modelar um sistema de distribuição de energia elétrica para coletar os dados de tensão e corrente elétrica, a fim de analisar os índices de distorção harmônica total e o fator de potência em cada barramento;
- Analisar a alocação de filtros passivos em um SEP modelado com a finalidade de adequar à norma brasileira vigente os índices de distorção harmônica em cada barramento.

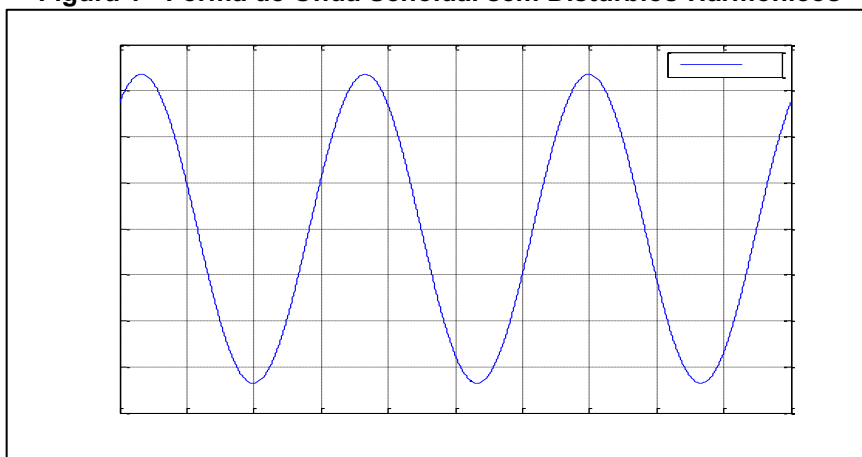
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção apresenta a descrição dos seguintes tópicos, são eles: Conceitos Fundamentais de Eletrônica de Potência, Harmônicas, Qualidade de Energia e Normativas Brasileiras; e, Filtros.

3.1 Conceitos Fundamentais de Eletrônica de Potência

Entender claramente os conceitos básicos que envolvem as grandezas elétricas fundamentais, especificamente, a tensão e a corrente elétrica, são essenciais para compreender suas relações com os elementos passivos em um circuito elétrico. A tensão ou a diferença de potencial [V] entre dois pontos é medida pelo trabalho necessário para transferir uma carga unitária de um ponto para o outro (7) enquanto a corrente elétrica é o fluxo de carga por unidade de tempo, medido em ampères [A] (8). A tensão e a corrente elétrica podem ser contínua ou alternada, sendo que, o comportamento contínuo é invariante ao longo do tempo e o comportamento alternado ou senoidal é variante ao longo do tempo (8). O comportamento senoidal ou cossenoidal de uma forma de onda é importantíssimo, pois influencia diretamente na qualidade de energia, vide a Figura 1 que exemplifica o comportamento senoidal de uma forma de onda com frequência de 60 [Hz].

Figura 1 - Forma de Onda Senoidal sem Distúrbios Harmônicos



Fonte: Autoria Própria (2020).

Os elementos passivos são aqueles que não geram energia para o circuito e apenas interagem com a energia, dissipando-a em outras formas, sendo que, os três elementos mais comuns são: o resistor, o capacitor e o indutor (9). Os resistores são versáteis cuja a finalidade é oferecer resistência à passagem da corrente elétrica pelo circuito, podendo operar como um limitador de corrente ou associado para construir um divisor de tensão, entre outras aplicações (10). O resistor é um componente linear, ou seja, quando submetido a uma diferença de potencial, a corrente que flui por ele varia linearmente com a amplitude da tensão aplicada, sendo que, de acordo com o Sistema Internacional de Unidades (S.I) sua unidade de medida é o ohm [Ω] (8).

Os capacitores possuem a característica de proporcionalidade entre a variação de tensão e da corrente que circula entre os seus terminais elétricos e a capacitância é a capacidade de armazenar energia sob a forma de um campo eletrostático (10). No S.I o valor da capacitância (C) é dado em Faraday [F]. Quando submetido à corrente alternada, o capacitor apresenta alternância de polarização em seus terminais, este efeito de "resistência" à corrente elétrica é denominado reatância capacitiva [X_C] (9). A reatância capacitiva é inversamente proporcional à frequência de oscilação da fonte de alimentação e possui uma inércia de tensão que causa o adiantando angular da corrente em relação à tensão em 90° (10). Normalmente, os capacitores são utilizados para compensar reativos e empregados na construção de filtros harmônicos. A Figura 2 apresenta alguns bancos de capacitores instalados em racks metálicos e utilizados com o objetivo de realizarem a compensação reativa nas redes de distribuição de energia elétrica (11).

Figura 2 - Banco de Capacitores em Rack Metálico



Fonte: Grid Energy Sistemas e Equipamentos (2020).

Basicamente, os indutores são enrolamentos de fio sobre uma superfície (com ou sem núcleo sólido), que armazenam energia de forma magnética (8). Quando o indutor é submetido a uma corrente contínua, ele comporta-se como um condutor comum, oferecendo ao circuito apenas sua resistência e acumulando energia na forma de campo magnético (9). Todavia, quando os indutores são submetidos a uma corrente alternada, a disposição espiral deles contribui para o efeito da indutância (L), que é a propriedade de gerar uma força contra eletromotriz ou tensão induzida (8). A indutância provoca o aparecimento da reatância indutiva (X_L), que é diretamente proporcional à frequência de oscilação da fonte e possui uma inércia de corrente que causa um atraso angular de 90° da corrente em relação à tensão. No S.I a unidade da indutância é o Henry [H] (10).

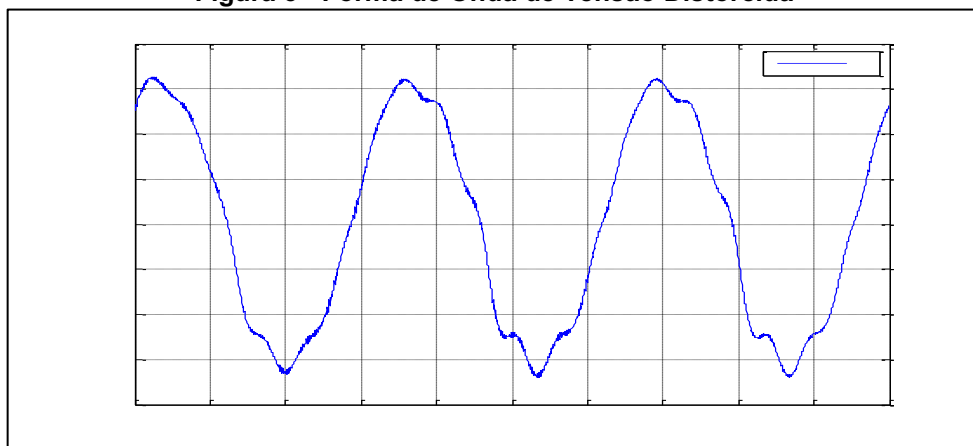
As cargas presentes em um SEP podem apresentar comportamento linear e não linear. A linearidade é a propriedade que combina as propriedades de homogeneidade e aditividade, além disso, ela estabelece uma relação proporcional entre causa e efeito (8). A homogeneidade requer que, se uma entrada (excitação) for multiplicada por uma constante, então a saída (resposta) será alterada proporcionalmente, enquanto a aditividade requer que, a resposta para a soma de entradas seja a soma das respostas de cada entrada aplicada separadamente (8) (12). Uma carga linear é aquela que possui a relação de linearidade entre a tensão e a corrente, nesse caso, não há distorção na forma de onda, pois esta impede a existência da linearidade. Desse modo, uma carga não linear é toda aquela que distorce a forma de onda da corrente mesmo quando alimentada por uma forma de onda de tensão senoidal (13).

3.2 Harmônicas

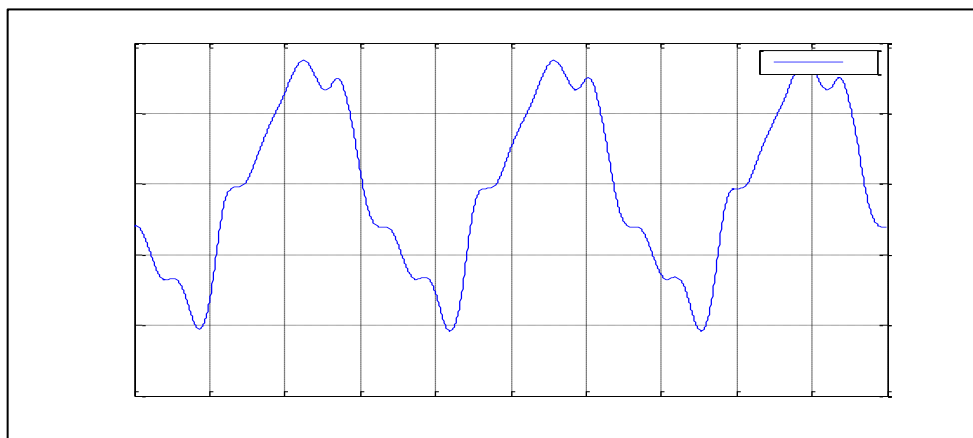
As harmônicas são ondas senoidais com frequências múltiplas inteiras da onda de frequência fundamental, que somadas constituem uma onda periódica e distorcida, sendo que, a característica distorcida da onda resultante é causada pelos harmônicas (13). Uma distorção de forma de onda é dita harmônica quando a deformação se apresenta de forma similar em cada ciclo da frequência fundamental, neste caso, o espectro contém apenas frequências múltiplas inteiras da fundamental (14). Há também o conceito de inter-harmônicas que são as ondas periódicas com frequências múltiplas não inteiras da onda de frequência fundamental, porém, estas não serão tratadas neste trabalho.

3.2.1 Causadores de Distorções Harmônicas

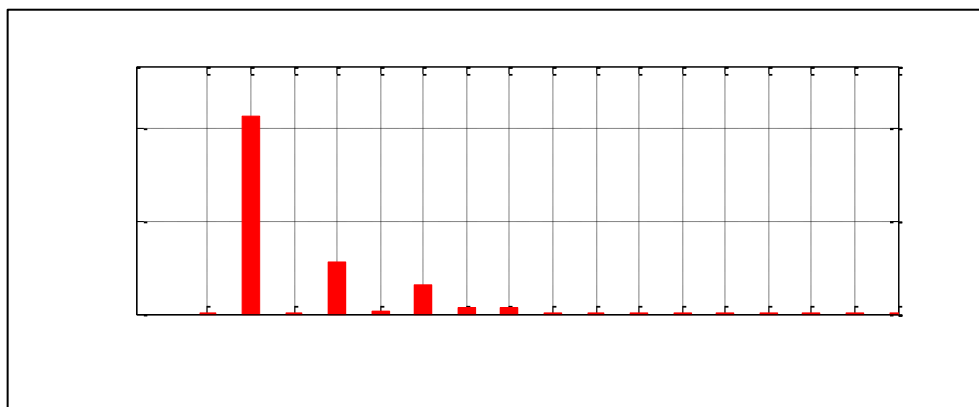
As distorções harmônicas geralmente são causadas por cargas que apresentam relação não linear entre tensão e corrente, tais como: transformadores e motores, que possuem núcleos ferromagnéticos sujeitos à saturação; cargas eletrônicas que produzem descontinuidades na corrente devido ao chaveamento dos conversores (13); e, fornos a arco e os compensadores reativos controlados por tiristores, que produzem distorções variáveis ao longo do tempo, o que pode levar ao aparecimento de frequências inter-harmônicas (14). Vide a Figura 3, Figura 4 e a Figura 5, que apresentam as formas de ondas de tensão e corrente distorcidas e o espectro com as componentes harmônicas de corrente.

Figura 3 - Forma de Onda de Tensão Distorcida

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 4 - Forma Onda de Corrente Distorcida

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 5 - Componentes Harmônicas da Corrente

Fonte: Autoria Própria (2020).

3.2.2 Impacto das Harmônicas e suas Consequências

De acordo com autores ALMONTE e ASHLEY (1995) citados na obra (14), e também o autor ROCHA (13), a presença de harmônicas em um SEP pode acarretar em uma série de efeitos indesejados, sendo que, os mais recorrentes são:

- a. Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias. Casos típicos: associações de capacitores com transformadores, cabos com blindagem, capacitores associados com motores, capacitores operando com reatores, dispositivos de correção de fator de potência etc.
- b. Aparecimento de vibrações e ruído. Casos típicos: ferrorressonância em transformadores e reatores, motores de indução ressonando com a compensação capacitiva etc.
- c. Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos. Casos típicos: aumento de perdas por histerese e correntes parasitas em núcleos de motores, geradores, transformadores, reatores, relés etc.
- d. Sobreaquecimento de capacitores. Casos típicos: ressonância de capacitores shunt, provocando sobretensão e perdas excessivas no dielétrico. Risco de explosão do capacitor por falta de dissipação do calor gerado internamente.
- e. Erro de medição de grandezas elétricas. Casos típicos: medidores de energia com disco de indução, medidores de valor eficaz baseados no valor de pico ou valor médio etc.
- f. Erro de controle de conversores. Casos típicos: detectores de sincronismo e comparadores de nível, usados como referência para gerar pulsos de controle em chaves eletrônicas;
- g. Erro de atuação da proteção. Casos típicos: relés eletromagnéticos atracando devido à contribuição das harmônicas, relés eletrônicos e digitais com erro de calibração na presença de distorções etc.
- h. Sobrecorrente de neutro. Casos típicos: circuitos com lâmpadas de descarga com reatores ferromagnéticos ou circuitos retificadores monofásicos podem provocar correntes de neutro maiores que as de linha, devido às harmônicas de sequência zero.
- i. Interferências e ruídos eletromagnéticos. Casos típicos: fontes chaveadas, inversores de frequência, pontes retificadoras, sistemas de acionamento controlados eletronicamente etc.

3.2.3 Grandezas Elétricas em Sistemas Não-Senoidais

Para realizar os cálculos das grandezas elétrica em sistemas não-senoidais, deve-se considerar tanto a componente fundamental quanto a residual (componentes harmônicas). Toda onda periódica pode ser expressa como um somatório de termos em seno e/ou cosseno com frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, ou seja, decompõe o sinal original com a transformada discreta de Fourier (TDF) (14). As equações apresentadas a seguir serão para um sistema monofásico não senoidal e estão em sua forma final, no entanto, para maiores detalhes de suas deduções, equacionamentos e aplicações em sistemas trifásicos, vide as obras (15) e (16).

O valor eficaz ou Raiz Quadrada da Média dos Quadrados (do inglês, Root Mean Square – RMS) de uma corrente ou tensão alternada é igual ao valor de uma tensão ou corrente contínua que libera a mesma potência média para um resistor (8). O valor da tensão e da corrente eficaz ou RMS podem ser obtidos por meio das equações 1 e 2:

$$V_{RMS} = \frac{V_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_{pico}}{\sqrt{2}} \quad (2)$$

Onde:

V_{RMS} : tensão média ou eficaz [V];

V_{pico} : tensão de pico [V];

I_{RMS} : corrente média ou eficaz[A];

I_{pico} : corrente de pico [A].

O termo valor eficaz verdadeiro (do inglês, True RMS) é aplicado quando há a garantia da precisão e da exatidão do valor eficaz até certa frequência máxima independentemente do formato da onda, seja ela uma senóide distorcida, uma onda quadrada ou triangular (17).

Segundo a IEEE Std. 1459-2010, a tensão e corrente não senoidal de regime permanente podem ser divididas em duas componentes distintas: a componente fundamental ($V_{RMS,1}$ e $I_{RMS,1}$) e a componente residual (V_H e I_H) (16). A componente residual da tensão e da corrente são dadas pelas equações 3 e 4, respectivamente:

$$V_H = V_O + \sum_{h \neq 1} V_{RMS,h} \quad (3)$$

$$I_H = I_O + \sum_{h \neq 1} I_{RMS,h} \quad (4)$$

Onde:

V_H : tensão eficaz residual [V];

I_H : corrente eficaz residual [A];

V_O : tensão contínua [V];

I_O : corrente contínua [A];

$V_{RMS,h}$: tensão eficaz de ordem harmônica h [V];

$I_{RMS,h}$: corrente eficaz de ordem harmônica h [A].

Sabendo que o valor eficaz verdadeiro é constituído pela parte fundamental somada a parte residual, dessa maneira, a tensão e a corrente eficaz verdadeira são dadas pelas equações 5 e 6, respectivamente:

$$V_{RMS} = \sqrt{V_{RMS,1}^2 + V_H^2} \quad (5)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{I_{RMS,1}^2 + I_H^2} \quad (6)$$

Onde:

V_{RMS} : tensão RMS ou eficaz verdadeira [V];

I_{RMS} : corrente RMS ou eficaz verdadeira [A];

$V_{RMS,1}$: tensão eficaz da componente fundamental [V];

$I_{RMS,1}$: corrente eficaz da componente fundamental [A].

3.2.3.1 Potências em Sistemas Não Senoidais

A potência instantânea é composta por duas componentes, a potência instantânea ativa e a não ativa, sendo que, a potência ativa contribui para a transferência de energia no sistema e para perdas ativas nos condutores (15), enquanto a potência instantânea não ativa não contribui para transferência de energia para o sistema, todavia, as correntes relacionadas à potência instantânea não ativa causam perdas nos condutores (8). Em um sistema não senoidal a potência ativa é composta pela potência ativa proveniente da componente fundamental e pela potência ativa proveniente das harmônicas (15) (16). A potência ativa fundamental, a potência ativa harmônica e a potência ativa eficaz são dadas pelas equações 7, 8 e 9, respectivamente:

$$P_1 = V_{RMS,1} \cdot I_{RMS,1} \cdot \cos(\theta_1) \quad (7)$$

$$P_H = V_O \cdot I_O + \sum_{h>1} [V_{RMS,h} \cdot I_{RMS,h} \cdot \cos(\theta_h)] \quad (8)$$

$$P = P_1 + P_H \quad (9)$$

Onde:

P_1 : potência ativa fundamental [W];

$V_{RMS,1}$: tensão eficaz fundamental [V];

$I_{RMS,1}$: corrente eficaz fundamental [A];

θ_1 : ângulo entre a tensão e a corrente eficaz fundamental;

P_H : potência ativa harmônica [W];

$V_{RMS,h}$: tensão eficaz de ordem harmônica h [V];

$I_{RMS,h}$: corrente eficaz de ordem harmônica h[A];

V_O : tensão contínua [V];

I_O : corrente contínua [A];

P : potência ativa eficaz [W].

A potência reativa fundamental é dada pela equação 10:

$$Q_1 = V_{RMS,1} \cdot I_{RMS,1} \cdot \text{sen}(\theta_1) \quad (10)$$

Onde:

Q_1 : potência reativa fundamental [VAr];

A potência aparente fundamental (S_1) está associada aos seus componentes fundamentais P_1 e Q_1 , que são as quantidades reais que ajudam a definir a taxa de fluxo da energia do campo eletromagnético associada à tensão e corrente fundamentais (15) (16). O módulo da potência aparente fundamental é dada pela equação 11:

$$S_1 = V_{RMS,1} \cdot I_{RMS,1} = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2} \quad (11)$$

Onde:

S_1 : potência aparente fundamental [VA];

P_1 : potência ativa fundamental [W];

Q_1 : potência reativa fundamental [VAr];

$V_{RMS,1}$: tensão eficaz fundamental [V];

$I_{RMS,1}$: corrente eficaz fundamental [A];

Na obra (16), a potência aparente é tratada a partir da separação de tensão e corrente eficaz em suas componentes fundamentais e harmônicas, vide a equação 14. Desse modo, é possível identificar separadamente a potência de distorção das harmônicas (D_H), da corrente (D_I) e da tensão (D_V), sendo que, estas três parcelas compõe a potência aparente não fundamental (S_N) (15) (16). A potência aparente eficaz é constituída por uma parcela fundamental e outra parcela harmônica, vide as equações 12, 13, 14 e 15:

$$S^2 = (V_{RMS} \cdot I_{RMS})^2 = (V_{RMS,1}^2 + V_{RMS,H}^2) \cdot (I_{RMS,1}^2 + I_{RMS,H}^2) \quad (12)$$

$$S^2 = (V_{RMS,1}^2 + I_{RMS,1}^2) + (V_{RMS,1}^2 \cdot I_{RMS,H}^2) + (V_{RMS,H}^2 \cdot I_{RMS,1}^2) + (V_{RMS,H}^2 \cdot I_{RMS,H}^2) \quad (13)$$

$$S^2 = S_1^2 + D_I^2 + D_V^2 + S_H^2 \quad (14)$$

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (15)$$

Onde:

S : potência aparente eficaz [VA];

$V_{RMS,1}$: tensão eficaz fundamental [V];

$I_{RMS,1}$: corrente eficaz fundamental [A];

$V_{RMS,h}$: tensão eficaz de ordem harmônica h [V];

$I_{RMS,h}$: corrente eficaz de ordem harmônica h [V];

D_I : potência de distorção de corrente [VAr];

D_V : potência de distorção de tensão [VAr];

S_H : potência aparente harmônica [VA];

S_N : potência aparente não fundamental [VA].

3.2.3.2 Fator de Potência Fundamental e Total

O fator de potência, independentemente da sua forma de onda de tensão ou de corrente é definido por meio da relação entre potência ativa e aparente. Quando há a presença de harmônicas é necessário fazer ressalvas a respeito da energia distorcida, e ainda existe muita discussão de qual método se deve utilizar para a determinação da potência reativa quando existem harmônicas (18).

Para sinais senoidais ou da componente fundamental, o fator de potência é o cosseno do ângulo de defasagem entre as componentes fundamentais da tensão e corrente, nesse caso, o fator de potência é denominado fator de potência de deslocamento ou fundamental (15), que é dado conforme a equação 16:

$$FP_1 = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (16)$$

Onde:

FP_1 : fator de potência fundamental;

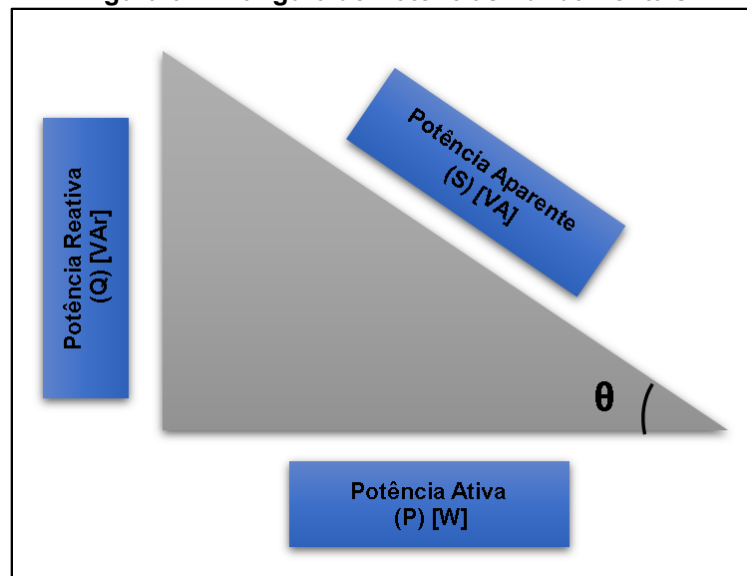
θ_1 : ângulo entre a tensão e a corrente eficaz fundamental;

S_1 : potência aparente fundamental [VA];

P_1 : potência ativa fundamental [W].

Analisando a equação 11, observa-se que as relações entre a potência ativa, reativa e aparente são expressas pelo teorema de Pitágoras, pois a potência aparente é a raiz quadrada da soma do quadrado dos catetos, potência ativa e reativa, respectivamente. A Figura 6 ilustra o triângulo de potências fundamentais.

Figura 6 - Triângulo de Potências Fundamentais



Fonte: Autoria Própria (2020).

A obra (16) apresenta um resumo gráfico de todas as direções convencionais do fluxo de energia. Na Figura 6 , o ângulo θ é o ângulo de fase da impedância complexa equivalente ($Z \angle \theta = I / V$), que também pode ser obtido por meio de equacionamentos trigonométricos. O cosseno do ângulo θ ou a divisão do cateto adjacente (P) pela hipotenusa (S) é denominado fator de potência de deslocamento ou fundamental (FP_1), neste caso somente a frequência fundamental constitui a forma de onda (18).

O fator de potência serve como um indicador de utilização, pois para uma dada potência aparente (S) e uma tensão (V), a utilização máxima da linha é obtida quando a potência ativa (P) for igual a potência aparente (S) (16). Para sinais não senoidais, o fator de potência é denominado fator de potência total ou verdadeiro (16), que é dado conforme a equação 17:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P_1 + P_H}{\sqrt{S_1^2 + S_N^2}} \quad (17)$$

Onde:

FP : fator de potência total ou verdadeiro;

S : potência aparente eficaz [VA];

S_1 : potência aparente fundamental [VA];

S_N : potência aparente não fundamental [VA].

P : potência ativa eficaz [W];

P_1 : potência ativa eficaz fundamental [W].

P_H : potência ativa eficaz não fundamental [W].

3.3 Qualidade de Energia e Normativa Brasileira

Segundo a ANEEL, a qualidade percebida pelo consumidor de uma concessionária de serviço público de distribuição de energia elétrica deve ser avaliada a partir de três grandes aspectos: a qualidade do produto, a qualidade do serviço e a qualidade do atendimento ao consumidor (19). O produto energia elétrica está relacionado à conformidade da tensão em regime permanente e à ausência de perturbações na forma de onda enquanto a qualidade do produto está relacionada à continuidade na prestação do serviço (5).

O PRODIST – Módulo 8/2018 estabelece os procedimentos relativos à QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado, enquanto as Condições Gerais de Fornecimento (Resolução Normativa nº 414/2010) disciplinam os aspectos relacionados à qualidade do atendimento ao consumidor, notadamente a qualidade do atendimento comercial, a qualidade do atendimento telefônico e o tratamento das informações (19). A qualidade de energia elétrica, resumidamente, trata dos seguintes assuntos: fator de potência, harmônicas, sobretensão, subtensão, transientes, flutuação de tensão e interrupções (18).

3.3.1 Aspectos Legais sobre o Fator de Potência

A Nota Técnica 0083/2012-SRD/ANEEL abriu audiência pública para debate visando a regulamentação do fator de potência considerando a distorção harmônica e almeja modificar itens na Resolução Normativa número 414/2010 e no próprio PRODIST (18) (20). Por meio da mesma resolução a ANEEL regulamenta a questão tarifária e estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, no entanto, as questões que envolvem o fator de potência estão especificadas na resolução normativa 418/2010 que retifica a resolução 414/2010 (21). O artigo 76 da resolução normativa 418/2010 aponta os consumidores dos quais deve ser medido o fator de potência: “O fator de potência da unidade consumidora, para fins de cobrança, deve ser verificado pela distribuidora por meio de medição permanente, de forma obrigatória para o grupo A e facultativa para o grupo B.” (21). As classificações dos

consumidores são dadas no Caderno Temático da ANEEL sobre as “Tarifas de fornecimento de Energia Elétrica” (18). Vide a Figura 7.

Figura 7 - Classes de Consumidores

Classe	Grupo	Classe de Tensão
A	A1	230 kV ou mais
	A2	88 a 138 kV
	A3	69 kV
	A3a	30 a 44 kV
	A4	2,3 a 25 kV
	AS	Sistema Subterrâneo
B	B1	Inferior a 2,3 kV (residencial)
	B2	Inferior a 2,3 kV (rural)
	B3	Inferior a 2,3 kV (Outras em BT)
	B4	Inferior a 2,3 kV (Iluminação Pública)

Fonte: Caderno Temático sobre Tarifas de Fornecimento de Energia Elétrica - ANEEL, Citado por PIRES (2014).

Os limites aceitáveis para o fator de potência são impostos no artigo 95 da resolução normativa 418/2010, que descreve: “O fator de potência de referência " f_R ", indutivo ou capacitivo, tem como limite mínimo permitido, para as unidades consumidoras dos grupos A e B, o valor de 0,92.” (21). O limite mínimo não considera o conteúdo harmônico e a faturação dos excedentes de energia e da demanda de reativos são realizados conforme o parágrafo único, dos artigos 96 e 97 da Resolução Normativa 414/2010 (18) (21). Portanto, em casos de inadequação a unidade consumidora deverá cumprir prazos estipulados na normativa mencionada para adequar a sua instalação ou a sua tarifa (18).

3.3.2 Aspectos Legais sobre as Distorções Harmônicas

A ANEEL estabelece por meio do PRODIST - Módulo 8/2018 como devem ser realizados os cálculos dos indicadores de distorções harmônicas e os limites de cada um desses indicadores. Os indicadores são focados na tensão elétrica e, portanto, a distorção harmônica total de tensão conforme o item 4.2.2 do PRODIST – Módulo 8/2018 recomenda é dada pela equação 18:

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} (V_h^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (18)$$

Onde:

DTT : distorção harmônica total de tensão [%];

V_h : módulo do valor eficaz da tensão harmônica de ordem h [V];

V_1 : módulo do valor eficaz da componente fundamental [V];

h = todas as ordens harmônicas de dois até $hmáx$;

$hmáx$ = ordem harmônica máxima.

A distorção harmônica total de tensão (DTT) indica em porcentagem o desvio total de uma forma de onda em relação à sua componente fundamental, uma senóide pura (5). O PRODIST – Módulo 8/2018 faz a separação da distorção harmônica total de tensão em três parcelas: em pares não múltiplos de três (DTT_P), em ímpares não múltiplas de três (DTT_I) e nas múltiplas de três (DTT_3). As distorções harmônicas totais de tensão pares, ímpares e múltiplas de três são dadas pelas equações 19, 20 e 21, respectivamente:

$$DTT_p = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} (V_h^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (19)$$

Onde:

DTT_p : distorção harmônica total de tensão das componentes pares não múltiplas de três [%];

h : todas as ordens harmônicas pares não múltiplas de três;

h_p : máxima ordem harmônica par não múltipla de três;

V_1 : Tensão eficaz da fundamental [V];

V_h : Tensão eficaz de ordem harmônica h [V].

$$DTT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} (V_h^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (20)$$

Onde:

DTT_i : distorção harmônica total de tensão das componentes ímpares não múltiplas de três [%];

h : todas as ordens harmônicas ímpares não múltiplas de três;

h_i : máxima ordem harmônica ímpar não múltipla de três.

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} (V_h^2)}}{V_1} \cdot 100 \quad (21)$$

Onde:

$DTT_3\%$: distorção harmônica total de tensão das ordens harmônicas múltiplas de três.

h : todas as ordens harmônicas múltiplas de três;

h_3 : máxima ordem harmônica múltipla de três.

Para estimar em porcentagem o desvio individual de uma tensão de ordem harmônica h em relação ao valor eficaz da componente fundamental, o PRODIST – Módulo 8/2018 (5), no item 4.2.2, expressa tal relação conforme a equação 22:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (22)$$

Onde:

DIT_h : distorção harmônica individual de tensão de ordem h [%];

V_h : módulo do valor eficaz da tensão harmônica h [V];

V_1 : módulo do valor eficaz da componente fundamental [V].

Conforme o item 4.3.1 do PRODIST – Módulo 8/2018, os limites que correspondem ao valor máximo desejável de cada indicador de distorção harmônica total de tensão a ser observado no sistema de distribuição (5). A Tabela 1 apresenta os limites dos indicadores de distorção harmônica total de tensão impostos pela ANEEL conforme as classes de tensão de alimentação.

Indicador	Tensão Nominal		
	($V_n \leq 1,0$) [kV]	($1,0 < V_n < 69$) [kV]	($69 \leq V_n < 230$) [kV]
DTT	10,0%	8,0%	5,0%
DTT_p	2,5%	2,0%	1,0%
DTT_1	7,5%	6,0%	4,0%
DTT_3	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: Adaptado de ANEEL, PRODIST (2018, p.15).

3.4 Filtros

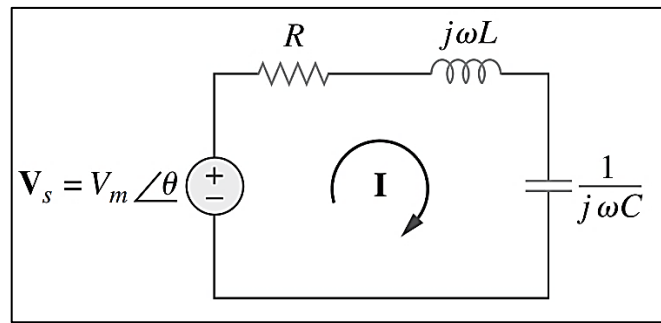
O conceito de filtros são parte integrante da evolução da engenharia elétrica e contribuiu em várias realizações tecnológicas, e devido a esta relevância, já foram escritos muitos artigos e livros, além de projetos e construções de filtros (22). Filtro é um circuito projetado para deixar passar sinais com frequências desejadas e rejeitar ou atenuar outras (23). Como dispositivo seletivo de frequências, um filtro pode limitar o espectro de frequências de um sinal para alguma faixa de frequências especificada, ou seja, ele pode selecionar um sinal desejado dentre outros sinais (22).

No âmbito referente à QEE, os filtros estão intrinsecamente relacionados ao fornecimento contínuo da característica senoidal de uma forma de onda, por isso, faz-se necessário a instalação de filtros de harmônicas como medida de adequação e técnica de mitigação de distorções harmônicas inadequadas. Desse modo, a principal função dos filtros é amenizar e/ou impedir que as harmônicas circulem pelas fontes de alimentação (24). Para realizar o projeto de filtros é essencial ter a ciência de alguns conceitos básicos, são eles: fator de qualidade, fator de dessintonia, tipos de associações e os tipos de filtros.

3.4.1 Fator de Qualidade

A característica de maior destaque da resposta de frequência de um circuito pode ser o pico de ressonância que aparece em sua curva característica de amplitude (22). O conceito de ressonância ocorre em qualquer circuito que tenha pelo menos um indutor e um capacitor, e em qualquer sistema que tenha um par conjugado de polos, pois estes são os causadores das oscilações de energia armazenada de uma forma para outra (23). Considere o circuito RLC mostrado na Figura 8 no domínio frequência e sua impedância de entrada dada pela equação 23:

Figura 8 - Circuito Ressonante em Série



Fonte: SADIKU (2013, p. 561).

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{V}_s}{\mathbf{I}} = R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} = R + j \cdot \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \quad (23)$$

Um circuito ressonante é projetado para operar na frequência de ressonância ou próximo dela e, segundo SADIKU (22), a ressonância é uma condição em um circuito RLC no qual as reatâncias capacitiva e indutiva são iguais em módulo, resultando em uma impedância puramente resistiva:

$$\text{Im}(\mathbf{Z}) = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) = 0 \quad (24)$$

O valor da frequência ω que satisfaz a condição da equação 24 é denominado frequência de ressonância ω_0 . Portanto, a condição de ressonância é dada por:

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \quad \text{ou} \quad \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (25)$$

Uma vez que $\omega_0 = 2\pi f_0$ [rad/s], a equação 25 assume a seguinte forma:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (26)$$

Onde:

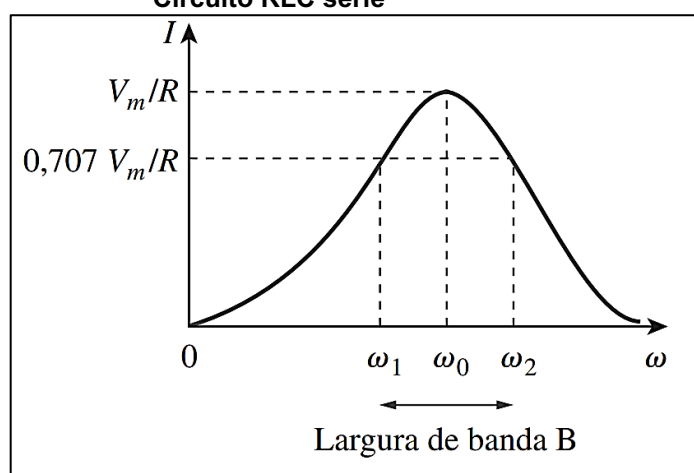
f_0 : frequência de ressonância [Hz];

L : indutância [H];

C : capacitância [F].

Os circuitos ressonantes são muito úteis na construção de filtros devido à característica de alta seletividade em termos de frequência, pois durante a ressonância a impedância se torna puramente resistiva (14), ou seja, a associação em série LC atua como um curto-circuito fazendo com que toda a tensão esteja sobre a resistência (22). A Figura 9 mostra o gráfico da resposta de frequência da amplitude da corrente do circuito série RLC apresentado na Figura 8.

Figura 9 - Amplitude da corrente versus frequência, Circuito RLC série



Fonte: SADIKU (2013, p. 562).

A maior potência dissipada no gráfico da Figura 9 ocorre no pico da onda durante a frequência de ressonância. Nas frequências de meia potência, ω_1 e ω_2 , a potência dissipada é dada conforme o gráfico apresentado na Figura 9. A equação 27 apresenta a relação entre as frequências de meia potência e a frequência de ressonância mostrando que a frequência de ressonância é a média geométrica das frequências de meia potência (23).

$$\omega_0 = \sqrt{\omega_1 \cdot \omega_2} \quad (27)$$

Onde:

ω_0 : frequência de ressonância [rad/s];

ω_1 : frequência de meia potência [rad/s];

ω_2 : frequência de meia potência [rad/s].

As frequências de meia potência geralmente não são simétricas em torno da frequência de ressonância e normalmente são próximas, pois a resposta de frequência não é simétrica (23). A largura da curva de resposta depende da largura de banda (B), sendo que a largura de banda (do inglês, bandwidth) é uma largura de banda de meia potência, pois é a largura da faixa de frequências entre as frequências de meia potência (22) (23), que é dada pela equação 28:

$$B = w_2 - w_1 \quad (28)$$

O nível de estreitamento da curva de ressonância em um circuito ressonante é medido quantitativamente pelo fator de qualidade (Q) (22). O fator de qualidade relaciona a energia máxima armazenada e a energia dissipada no circuito por ciclo de oscilação, pois durante a ressonância, a energia reativa no circuito oscila entre o indutor e o capacitor (23). Vide a equação 29:

$$Q = \frac{2\pi \cdot f_0 \cdot L}{R} = \frac{w_0 \cdot L}{R} = \frac{1}{w_0 \cdot C \cdot R} \quad (29)$$

Onde:

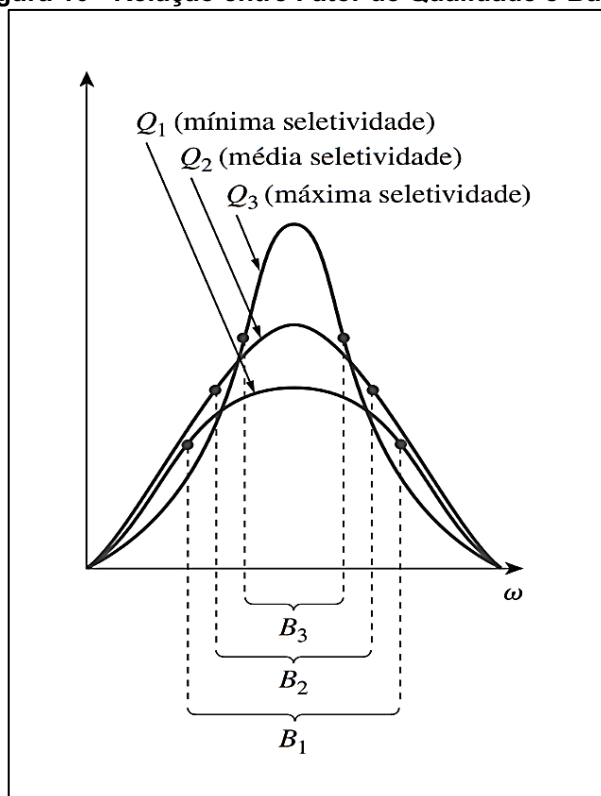
- Q : fator de qualidade;
- f_0 : frequência de ressonância [Hz];
- w_0 : frequência de ressonância [rad/s];
- R : resistência [Ω];
- L : indutância [H];
- C : capacitância [F].

A relação entre a largura de banda (B) e o fator de qualidade (Q) é dada pela equação 30:

$$B = \frac{R}{L} = \frac{w_0 \cdot L}{Q} \quad (30)$$

Vale ressaltar que as equações 23 à 30 são específicas para o circuito RLC série apresentado na Figura 8 e para maior detalhes dos equacionamentos podem ser consultadas as obras (22) (23). Conforme ilustrado na Figura 10, quanto maior o valor de (Q), mais seletivo é o circuito, porém menor a largura de banda.

Figura 10 - Relação entre Fator de Qualidade e Banda



Fonte: SADIKU (2013, p. 562).

A seletividade de um circuito RLC é a capacidade de resposta do circuito a certa frequência e segregar todas as demais frequências (23). Se a faixa de frequências a ser selecionada ou rejeitada for estreita, o fator de qualidade do circuito ressonante deve ser elevado, caso contrário, o fator de qualidade deve ser baixo (22). Um circuito apresenta fator de qualidade elevado quando $Q \geq 10$, nesse caso, as frequências de meia potência são consideradas simétricas em torno da frequência de ressonância (22) (23).

3.4.2 Fator de Dessintonia

O fator de dessintonia possui grande relevância dentre os parâmetros para o correto dimensionamento dos filtros harmônicos, pois ele pode causar grande impacto no desempenho de filtros harmônicos, principalmente nos sintonizados (25). A dessintonia pode ser causada propositalmente por necessidade de projeto ou pela variação indesejada dos componentes do filtro e/ou características do sistema (26), nesse caso não proposital, as variáveis que mais influenciam são: tolerância de fabricação dos componentes passivos, variação da temperatura, queima de elementos capacitivos e alteração da frequência da rede elétrica (25) (27).

A dessintonia é o distanciamento da ordem de ressonância de um filtro com a frequência harmônica que se deseja filtrar, sendo que, quanto maior este valor, o filtro mitigará um percentual menor desta harmônica (26) (27). Portanto, o fator de sintonização serve para avaliar o grau de dessintonização do filtro, ou seja, a tolerância aceitável que o filtro poderá operar fora da frequência nominal sintonizada (25). O fenômeno da ressonância pode ser evitado por meio da instalação de indutores de dessintonia em série com os capacitores, o que garante maior expectativa de vida aos capacitores pelo aumento da impedância dos mesmos contra as correntes harmônicas (28). A Figura 11 apresenta os indutores de dessintonia utilizados pela empresa Grid Energy.

Figura 11 - Banco de Reatores (indutores de dessintonia)



Fonte: Grid Energy Sistemas e Equipamentos (2020).

Segundo os autores Watson e Neville citados na obra (25), uma variação de 2% nos valores do indutor ou do capacitor causa a mesma dessintonização de uma variação de 1% na frequência do sistema. Deste modo, o fator de dessintonização é comumente expresso pela equação 31:

$$\delta = \frac{\Delta f}{f_n} + \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\Delta L}{L_n} + \frac{\Delta C}{C_n} \right) \quad (31)$$

Onde:

δ : fator de dessintonização;

Δf : variação de frequência [Hz];

f_n : frequência fundamental [Hz];

ΔL : variação de indutância [H];

ΔC : variação de capacitância [F];

L_n : indutância nominal [H];

C_n : capacitância nominal [F].

Para a realização do projeto do filtro os autores Gonzalez & McCall (1987), Verma & Singh (2010) e Leite (2017) citados na obra (26) utilizam valores ligeiramente abaixo da ordem harmônica multiplicando a ordem (h) por 0,95 e verifica-se que os cálculos são entre 3% e 5% abaixo do valor da ordem harmônica. Vide a tabela 2.

Tabela 2 - Valores de Ordem Harmônica (h)

Ordem harmônica real (h)	3	5	7	11	13	H
Valor de (h) considerado	2,8	4,7	6,6	10,4	12,3	0,95. h

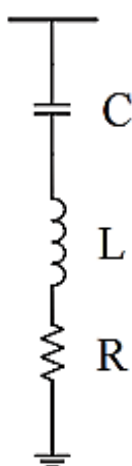
Fonte: Autoria própria (2020).

3.4.3 Filtros Ativos e Passivos

O filtro ativo é caracterizado por ser constituído de componentes ativos e composto por um circuito de potência e um sistema de controle, com a finalidade de compensar as harmônicas contidas na corrente consumida por cargas não lineares (26). De acordo com os autores Schwarz e Melchior (2006) citados na obra (25), o filtro ativo possui ótimo desempenho em vários casos de mitigação de harmônicas, porém seu custo é muito elevado para sistemas de média e alta tensão, como os sistemas de distribuição.

Uma das técnicas mais empregadas para realizar a mitigação harmônica é a aplicação de filtros harmônicos passivos sintonizados, pois eles realizam tanto a mitigação de harmônicas como a compensação reativa (24), além disso, a preferência pelo filtro passivo envolve fatores como o menor custo e a robustez (4). O tipo de filtro a ser abordado com ênfase no presente trabalho é o filtro passivo, por isso, não será dado maior detalhes a respeito do filtro ativo. O filtro passivo de harmônicos de corrente é composto basicamente pela variação de arranjo e quantidade de elementos capacitivos, indutivos e resistivos (26). A Figura 12 ilustra a topologia de um filtro passivo sintonizado simples enquanto a Figura 13 mostra um exemplar real do catálogo de vendas da empresa Grid Energy.

Figura 12 – Topologia Filtro Passivo Sintonizado Simples



Fonte: DA SILVA (2019, p.34).

Figura 13 - Exemplar Real Filtro Sintonizado

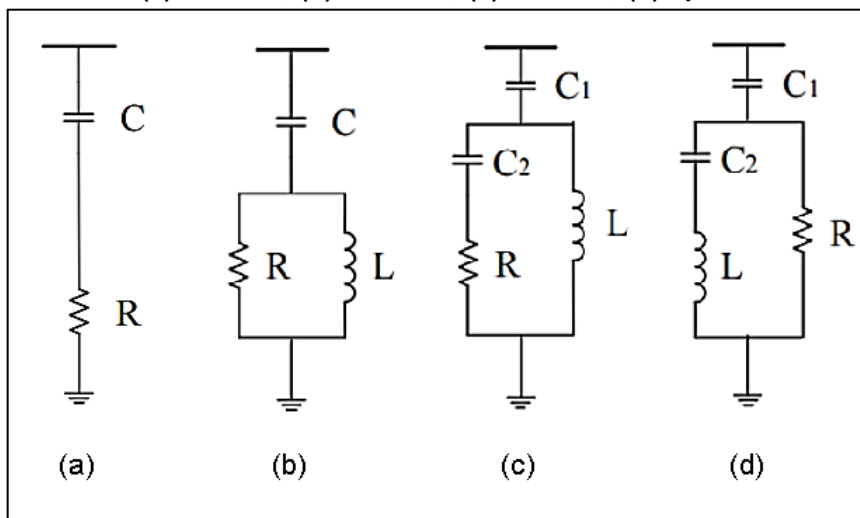


Fonte: Grid Energy (2020).

O filtro sintonizado e o filtro passa-alta ou amortecido são os dois tipos de filtros passivos mais empregados em sistemas de potência, devido a simplicidade de projeto e o menor custo de implementação (26). No filtro sintonizado, os ramos LC em série são sintonizados próximo das frequências que se quer mitigar, sendo que, para as frequências mais altas usa-se um capacitor funcionando como filtro passa-alta e a resistência serve para limitar a corrente que passará pelos componentes do filtro (29).

O filtro do tipo sintonizado simples é composto por um circuito RLC em série (Vide a Figura 8) e é dimensionado para apresentar baixa impedância em uma frequência (30), no entanto, para um grupo de frequências devem adicionar outros ramos paralelos, sendo que, cada ramo é composto pelo circuito série necessário para a mitigação da harmônica específica (22). O filtro do tipo passa-alta é dimensionado para apresentar baixa impedância para todas as faixas de frequências situadas acima da frequência de corte especificada (23). A Figura 14 apresenta as topologias de filtros do tipo passa alta.

Figura 14 - Tipos de filtros passivos passa-alta ou Amortecido:
(a)1ªOrdem; (b) 2ªOrdem; (c)3ªOrdem; (d)Tipo C



Adaptado de DA SILVA (2019, p.35-36).

A Figura 14 (a) é a topologia do modelo mais simples ou de 1ª ordem do filtro passa alta, constituída por um capacitor em série com um resistor limitador da corrente que flui pelo capacitor, sendo que, a performance do filtro passa-alta de 1ª ordem é insatisfatória para baixas frequências (31), que são frequências abaixo de 5 [kHz] conforme autor Dugan et .al (2002) citado na obra (26).

Os filtros passa alta de 2ª e 3ª ordem e do tipo C cujas topologias estão apresentadas na Figura 14 (b), (c) e (d), atuam como um filtro sintonizado para frequências abaixo da frequência sintonizada e semelhante a um filtro de 1ª ordem para as altas (31). O filtro de 3ª ordem e do tipo C apresentam grande impedância capacitiva na frequência fundamental e uma pequena impedância sobre uma banda de altas frequências (31). A Figura 15 mostra um exemplar real de filtro passivo passa alta ou amortecido oferecido no catálogo de vendas da empresa Grid Energy.

Figura 15 - Exemplar Real de Filtros Passivos Passa-Alta ou Amortecido

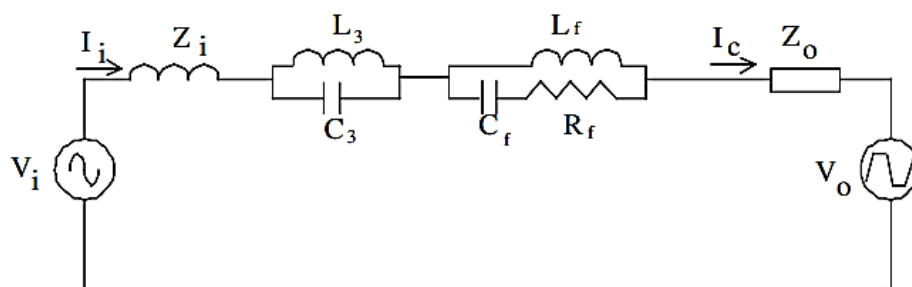


Fonte: Grid Energy (2020).

3.4.4 Configurações de Instalação dos Filtros

Há duas configurações para a instalação de filtros: em série e em paralelo ou derivação (do inglês, Shunt). Segundo os autores González & McCall (1987) citados na obra (26), os filtros do tipo série são instalados em série com o alimentador e devem suportar a corrente total de carga e possuir isolamento para a tensão plena da linha, sendo que, tais fatos são desvantagens, pois eleva o custo dos componentes a serem dimensionados (29). A Figura 16 apresenta a configuração em série de filtros passivos.

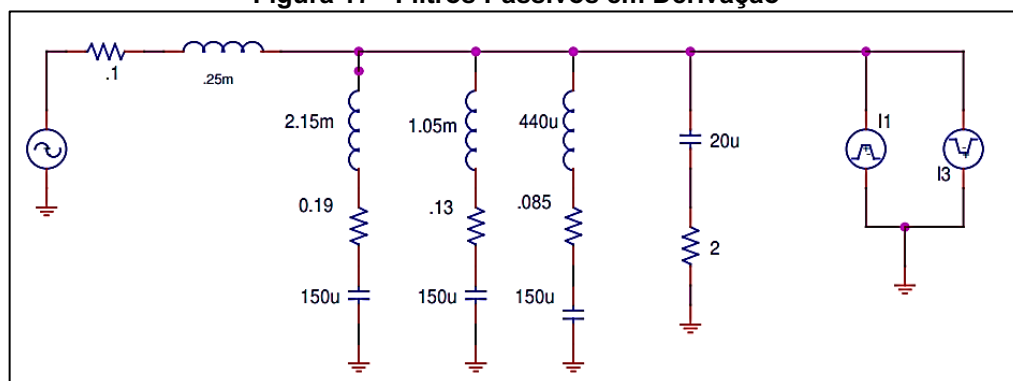
Figura 16 - Filtros Passivos em Série



Fonte: DECKMANN e POMILIO (2009, p.6).

Os filtros instalados em paralelo ou derivação (do inglês, Shunt) são aterrados em um dos terminais e servem de caminho de menor impedância para escoar a corrente harmônica para a qual foi sintonizado (22), além disso, eles podem fornecer potência reativa na frequência fundamental para compensação do fator de deslocamento, por esse motivo, ele é muito usual em sistemas de altas potências (23). Os filtros paralelos podem ser de diversas estruturas e configurações, como por exemplo, passivo sintonizado, passivo passa-alta, ativo ou híbrido (26). De acordo com os autores Verma & Singh (2010) citados na obra (26) filtros ativos são normalmente utilizados em sistemas de baixa e média tensão, enquanto os passivos em sistemas de alta tensão, tal fato ocorre devido à necessidade do uso de chaves de alta tensão e de conversores multiníveis, que tornam caro e complexo o sistema. Os filtros a serem projetados neste trabalho são os filtros passivos em derivação e a seguir será explicado sobre o projeto dos mesmos, vide a Figura 17.

Figura 17 - Filtros Passivos em Derivação



Fonte: DECKMANN e POMILIO (2009, p.2).

3.4.5 Projeto do Filtro

Nos tópicos anteriores foram apresentados conceitos básicos de suma importância para o projeto de filtros, sabendo que todos os tipos de filtros apresentam bom desempenho nos sistemas elétricos quando bem projetados. Segundo os autores Arrillaga & Watson (2003) citados na obra (26), o dimensionamento do filtro depende da potência reativa que o filtro fornece na frequência fundamental e que melhora o fator de potência para o valor igual ou superior a 0,92.

Segundo os autores Bonner et.al, Peeran et.al, Almonte e Ashley (1995) citados na obra (29), a distribuição da capacitância total pode ser proporcional à corrente total que deve fluir por cada ramo, ou ainda, dividindo -a em função da ordem harmônica do ramo do filtro, cabendo uma parcela maior a determinado filtro. A corrente e a tensão do banco de capacitores são calculadas a partir das equações 1 e 2. Então, a potência reativa banco de capacitores (Q_C) é dada pela equação 32:

$$Q_C = P \times (\tan(\cos^{-1}(FP_1)) - \tan(\cos^{-1}(FP_{1,D}))) \quad (32)$$

Onde:

Q_C : potência reativa do banco de capacitores [VAr];

P : potência ativa eficaz [W];

FP_1 : fator de potência fundamental atual;

$FP_{1,D}$: fator de potência fundamental desejado.

A impedância do filtro é dada pela equação 23. Além da equação 32, segundo PEREIRA (32) a potência reativa pode ser calculada da seguinte maneira:

$$Q_C = \frac{V^2}{(X_C - X_L)} = \frac{V^2}{X_C \cdot (1 - w_1^2 \cdot L \cdot C)} = \frac{V^2}{X_C \cdot (1 - 1/h_f^2)} \quad (33)$$

Onde:

Q_C : potência reativa do filtro [VAR];

X_L : reatância indutiva do filtro [Ω];

X_C : reatância capacitiva do filtro [Ω];

L : indutância [H];

C : capacitância [F].

w_1 : frequência fundamental [Hz];

h_r : ordem harmônica de sintonia.

Isolando a reatância capacitiva da equação 33, têm-se a reatância capacitiva efetiva do filtro:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \cdot \frac{h_r^2}{(h_r^2 - 1)} \quad (34)$$

Sabendo que, a reatância indutiva (X_L) é igual à reatância capacitiva (X_C) na frequência harmônica de sintonia, a reatância do indutor do filtro é dada pela equação 35:

$$X_L = \frac{X_C}{h_r} = \frac{X_C}{(h - d)^2} \quad (35)$$

Onde:

h : ordem harmônica de sintonia.

d : fator de dessintonia.

A equação 23 apresenta a reatância indutiva e capacitava escritas em função da indutância e da capacitância, portanto, isolando tais grandezas obtém-se as equações:

$$L = \frac{X_L}{w} \quad (36)$$

$$C = \frac{1}{X_C \cdot w} \quad (37)$$

Onde:

X_L : reatância indutiva do filtro [Ω];

X_C : reatância capacitiva do filtro [Ω];

L : indutância [H];

C : capacitância [F].

w : frequência [Hz];

O valor da resistência do filtro pode ser calculado a partir da equação 29, pois isolando a resistência obtém-se as seguintes equações:

$$R = \frac{w \cdot L}{Q} \quad (38)$$

$$R = \frac{1}{w \cdot C \cdot Q} \quad (39)$$

Onde:

R : resistência do filtro [Ω];

L : indutância [H];

C : capacitância [F].

w : frequência fundamental [Hz];

Q : Fator de Qualidade.

4 METODOLOGIA

A organização metodológica para o desenvolvimento deste trabalho baseia-se nos tópicos citados a seguir e explanados detalhadamente ao longo desta seção, são eles:

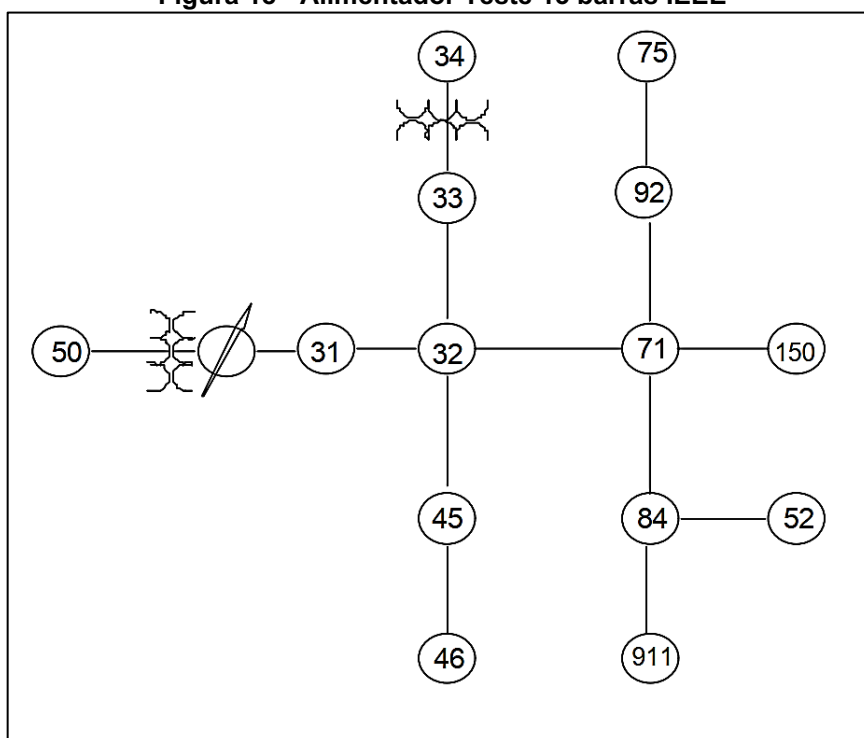
- Modelagem, simulação e extração de dados do sistema de teste 13 barras IEEE;
- Elaboração de algoritmo para tratar os dados extraídos provenientes da simulação;
- Projeto dos filtros, alocação manual, análise dos indicadores de distorções harmônicas e o parecer técnico final.

4.1 Modelagem, Simulação e Extração de Dados

A modelagem do sistema teste de 13 barras da IEEE foi realizada via o software ATPDraw (33), pois a interface gráfica facilita a construção da rede com vários barramentos e possibilita a análise dos valores de corrente e tensão elétrica nos barramentos ou qualquer outro ponto desejado. O ATPDraw é um pré-processador gráfico que contém a integração do programa de simulação e plotagem do ATP (do inglês - *Alternative Transients Program*) do EMTP (Electromagnetic Transients Program), desse modo, pode-se construir circuitos elétricos e gerar arquivos de entrada no formato apropriado (33), sendo que, os principais recursos do ATPDraw podem ser entendidos e consultados no manual do software (34).

Os parâmetros, as orientações e as considerações de modelagem dos componentes (linhas de distribuição, transformadores, cargas e outros) do alimentador teste de 13 barras foram coletados do documento de modelagem e análise de sistema elétrico de distribuição emitido pela IEEE (35), sendo que, as partes de interesse desse documento está contido no Anexo A – Dados e Informações do SEP Teste. A Figura 18 apresenta o esquemático do alimentador 13 barras da IEEE mencionado.

Figura 18 - Alimentador Teste 13 barras IEEE

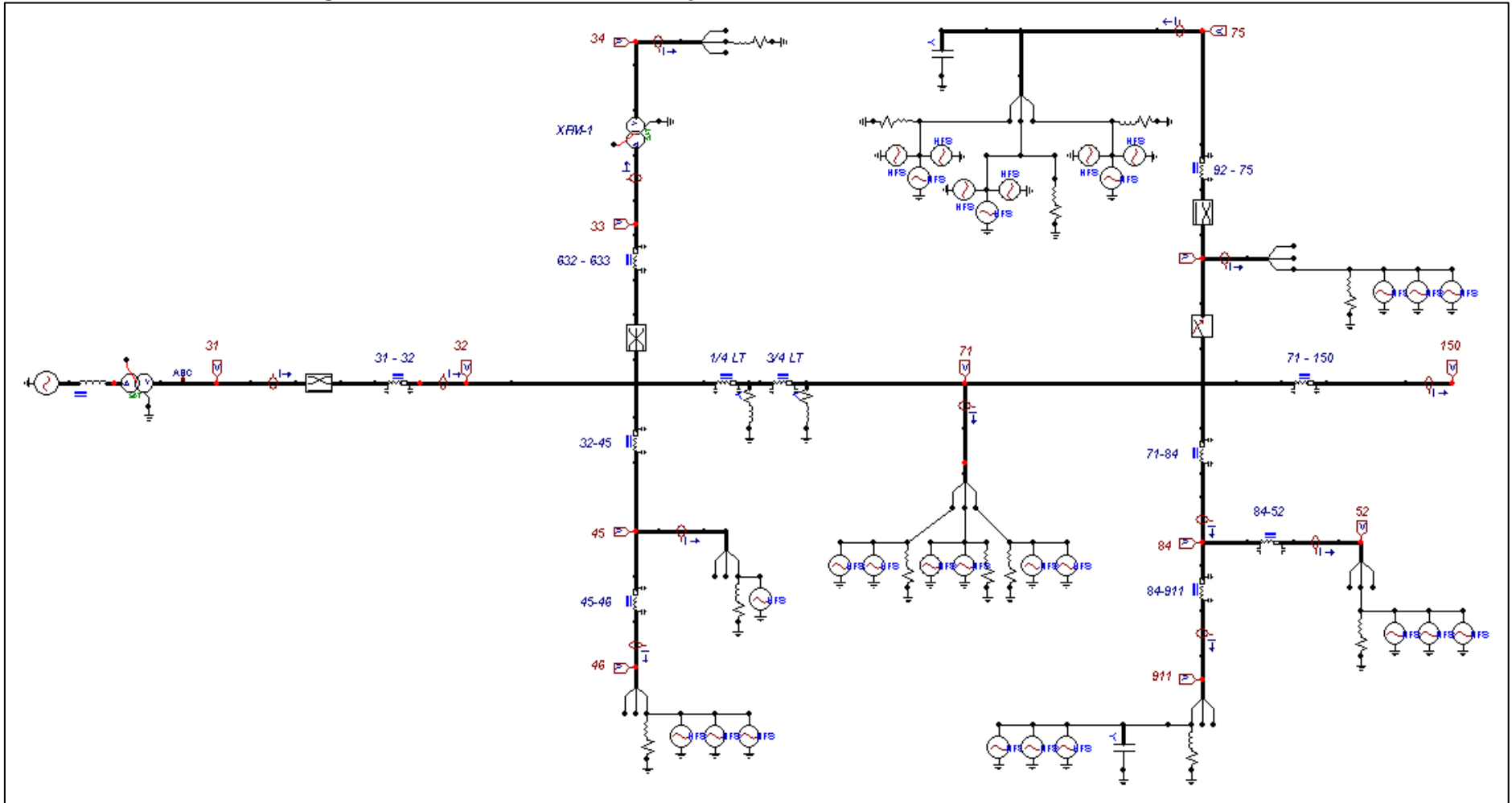


Fonte: Comitê de Transmissão e Distribuição IEEE (1992, p.3).

Com o auxílio do Anexo A – Dados e Informações do SEP Teste, o sistema foi modelado, sendo que, houve a necessidade de realizar as conversões das distâncias e das impedâncias de linha em função das distâncias, além de, fazer a conversão das potências em impedâncias, dessa maneira, as cargas convencionais foram modeladas como impedâncias constantes de RL, obtidas a partir do dado kVA a 60Hz. A Figura 19 mostra o sistema modelado via o software ATPDraw.

Após a modelagem do sistema foram realizadas as simulações e plotagens no próprio ATPDraw para visualizar os comportamentos e auxiliar na validade da modelagem, além disso, os valores de tensão e corrente elétrica nas fases ABC de cada um dos barramentos foram exportadas e criou-se um banco de dados, para que em seguida fosse realizado o tratamento desses dados via o software MATLAB®.

Figura 19 - Sistema Teste de Distribuição de 13 Barramentos Desbalanceados Modelado



Fonte: Autoria Própria (2020).

4.2 Elaboração de Algoritmo de Tratamentos de Dados

O algoritmo foi elaborado via o software MATLAB® para que realizasse a análise da tensão e da corrente de cada uma das fases em cada um dos barramentos do sistema, tendo como finalidade, determinar e obter os valores das seguintes grandezas elétricas e indicadores de distorção harmônica, são eles: tensão e corrente eficaz fundamental; tensão e corrente eficaz verdadeira; Distorção Harmônica Total de Tensão, segundo o PRODIST - Módulo 8/2018; e, o fator de potência de deslocamento, verdadeiro e de distorção.

É válido ressaltar que para a determinação das grandezas elétricas e dos indicadores de distorções harmônicas foram utilizadas as equações apresentadas nos subtópicos 3.2.3 e 3.3.2, sobre as Grandezas Elétricas em Sistemas Não-Senoidais e os Aspectos Legais sobre as Distorções Harmônicas, respectivamente. A análise dos indicadores fez-se de acordo com as normativas e considerações apresentadas no subtópico 3.3.2.

O nível de tensão do SEP modelado é de 4,16 [kV], portanto, de acordo com a Tabela 1, encontra-se na faixa de tensão nominal entre 1,0 [kV] e 69 [kV], e conseqüentemente, o limite máximo permitido para a DTT é de 8%. O Quadro 1 apresenta os valores de distorção harmônica total de tensão do artigo da IEEE para efeito comparativo. O Quadro 2 apresenta os valores de DTT obtidos por meio da simulação, nesse caso, os valores das injeções harmônicas foram incluídos conforme os valores fornecidos. Porém observa-se que o sistema nesta configuração inicial apresenta baixo nível de distorção harmônica, desse modo, fez-se necessário elevar a amplitude das correntes harmônicas injetadas. O Quadro 3 apresenta os valores após o incremento realizado nas amplitudes das correntes harmônicas injetadas, sendo que, nesse cenário verifica-se maiores níveis de distorções harmônicas, sendo que, tal configuração tornou-se o caso base (sem filtros) para o estudo.

Quadro 1 - DTT nas Barras apresentados no artigo da IEEE

Barra nº	Fase A	Fase B	Fase C
32	1,96 %	1,76 %	1,69 %
33	1,96 %	1,76 %	1,69 %
34	0,96 %	0,96 %	1,04 %
71	3,23 %	2,76 %	2,86 %
75	3,35 %	2,82 %	2,95 %
52	3,30 %		
911			3,00 %

Fonte: IEEE (1992, p. 3).

Quadro 2 - DTT nas Barras (Simulação Inicial)

Barra nº	Fase A	Fase B	Fase C
31	1,0487 %	0,9007 %	0,7036 %
32	2,0107 %	2,0007 %	1,6671 %
33	2,0109 %	2,0007 %	1,6669 %
34	1,0016 %	1,0016 %	1,0252 %
45	-	1,9694 %	-
46	-	1,9716 %	-
52	3,0772 %	-	-
71	3,1022 %	3,2733 %	2,7614 %
75	3,2662 %	3,4013 %	2,8433 %
84	3,0772 %	3,2733 %	2,9264 %
92	-	-	2,7614 %
150	3,1028 %	3,2735 %	2,7612 %
911	-	-	2,9916 %

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 3 - DTT nas Barras (Caso Base do Estudo)

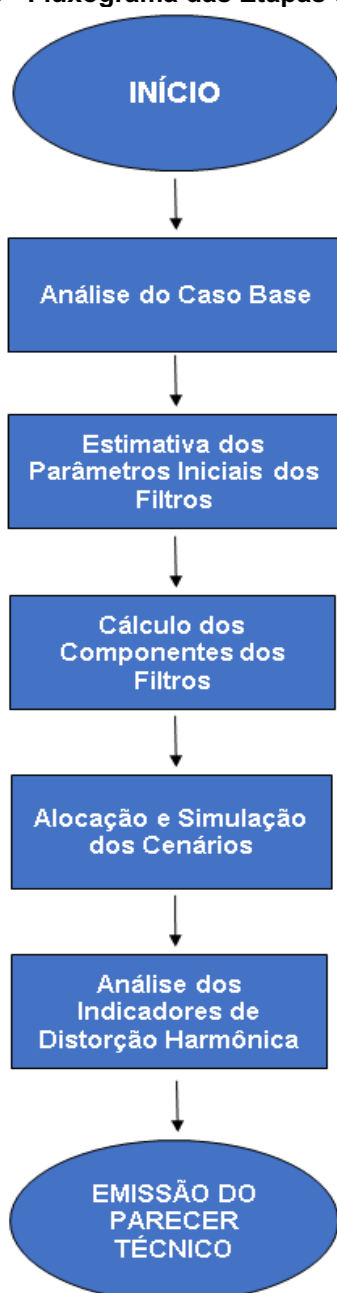
Barra nº	Fase A	Fase B	Fase C
31	3,2647 %	3,1651 %	2,9654 %
32	8,3968 %	8,8587 %	8,5564 %
33	8,3971 %	8,8587 %	8,5562 %
34	4,167 %	4,1656 %	4,2561 %
45	-	8,9874 %	-
46	-	9,0721 %	-
52	14,7014 %	-	-
71	14,0985 %	14,4225 %	14,7291 %
75	14,5036 %	14,7758 %	15,0319 %
84	14,7014 %	14,4225 %	15,5247 %
92	-	-	14,7291 %
150	14,1048 %	14,4217 %	14,7292 %
911	-	-	15,8014 %

Fonte: Autoria Própria (2020).

4.3 Projeto de Filtros

Para o projeto dos filtros foram considerados os conceitos e as equações abordados no tópico 3.4, sendo que, foram projetados os filtros conforme a necessidade de compensação reativa e mitigação harmônica. O projeto dos filtros e a análise dos indicadores de distorção harmônica deu-se conforme o fluxograma das etapas de projeto do filtro, vide a Figura 20.

Figura 20 - Fluxograma das Etapas do Projeto



Fonte: Autoria Própria (2020).

5 RESULTADOS

Baseando-se no fluxograma de projeto dos filtros apresentada na metodologia proposta, a análise dos indicadores de distorção harmônica e a emissão de um parecer técnico deu-se por meio dos resultados obtidos. Portanto, nesta seção são apresentados os resultados obtidos e o parecer técnico que faz a relação entre os resultados obtidos e os objetivos deste trabalho. A seguir, cada etapa do projeto será apresentada com os seus respectivos resultados alcançados.

5.1 Análise do Caso Base

Os valores dos indicadores DTT , DTT_3 , DTT_I e DTT_P referentes a cada um dos barramentos do caso base (sistema sem filtros) estão apresentados tanto no Quadro 3 quanto no Quadro 14 no APÊNDICE B – Resultados Obtidos. Após a análise minuciosa de tais resultados, verifica-se que as componentes harmônicas de terceira e quinta ordem contribuem significativamente para os índices de distorção harmônica, DTT_3 e DTT_I , respectivamente. Baseado nisso, constata-se que os barramentos que apresentaram as maiores taxas de distorções harmônicas foram as barras 71 e 75, por isso, os filtros sintonizados para mitigar as harmônicas de 3ª e 5ª ordem foram projetados e alocados tanto nessas barras, e também na barra 32. Além disso, foram aproveitados os bancos de capacitores (BC) existentes nas barras 75 e 911.

5.2 Estimativa dos Parâmetros Iniciais dos Filtros

O valor considerado para o fator de qualidade dos filtros foi de 30, pois tal valor encontra-se dentro da faixa permitida conforme mencionado no subtópico 3.4.1. O fator de dessintonia considerado foi de 0,1, dessa maneira, os filtros foram sintonizados nas ordens harmônicas de 2,9 e 4,9 para evitar o fenômeno de ressonância conforme apresentado no subtópico 3.4.2. Anteriormente foi mencionado que os filtros devem realizar a compensação reativa, portanto, a potência reativa necessária foi obtida considerando a necessidade local e por meio do cálculo realizado utilizando a equação 32. O fator de potência desejado considerado foi o valor de 0,98.

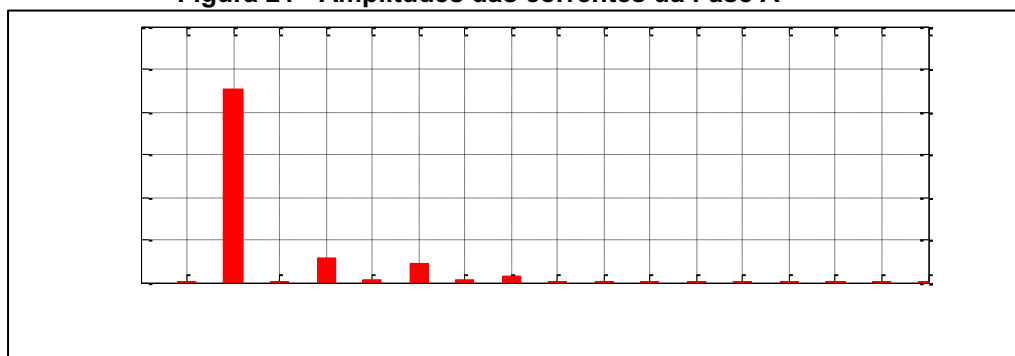
Para o dimensionamento dos componentes dos filtros, inicialmente obteve-se a potência reativa total por meio da equação 32. Por exemplo, no caso em que os filtros foram instalados na barra 32, utilizou-se os valores de potência ativa e fator de potência deste barramento apresentados no quadro 17 e o cálculo deu-se da seguinte maneira:

$$Q_C = P \times (\tan(\cos^{-1}(FP_1)) - \tan(\cos^{-1}(FP_{1,D}))) \quad (32)$$

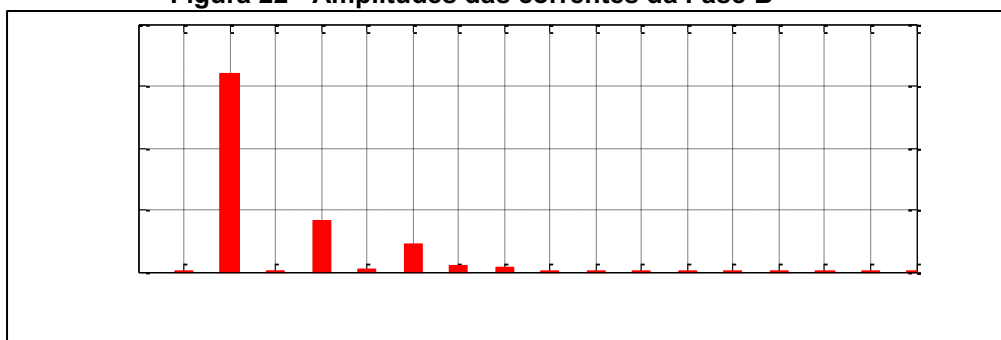
$$Q_C = 2011050 \times (\tan(\cos^{-1}(0,9634)) - \tan(\cos^{-1}(0,98)))$$

$$Q_C = 150320,567 \text{ [Var]}$$

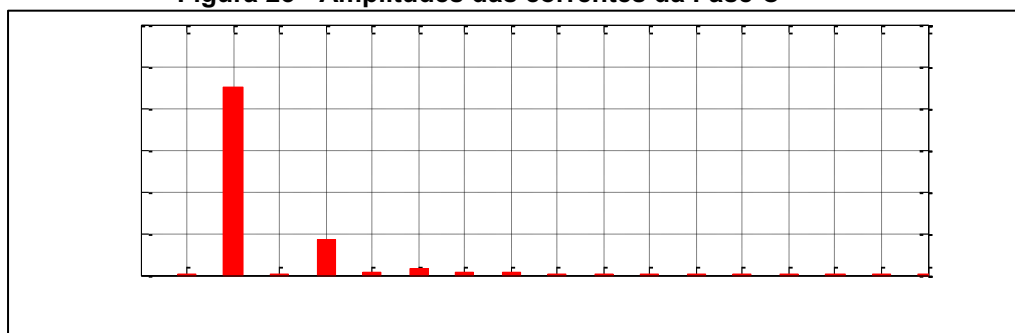
Posteriormente, com os espectros de frequências dos sinais de corrente das fases ABC apresentadas nas Figuras 21, 22 e 23 foram obtidos os valores das amplitudes da componente fundamental e das componentes de 3ª e 5ª ordem.

Figura 21 - Amplitudes das correntes da Fase A

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 22 - Amplitudes das correntes da Fase B

Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 23 - Amplitudes das correntes da Fase C

Fonte: Autoria Própria (2020).

Os valores das amplitudes das correntes e as proporções encontram-se apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 - Proporções da distribuição da Potência Reativa

Fases	Ordem	Barra 32		Barra 71		Barra 75		Barra 911	
		I [A]	[%]	I [A]	[%]	I [A]	[%]	I [A]	[%]
Fase A	1ª	452	-	86,3		282			
	3ª	67,7	54	14,2	65	40,2	50		
	5ª	58,3	46	7,79	35	40,8	50		
Fase B	1ª	320		90,3		95,3			
	3ª	89,9	65	13,6	65	73,4	60		
	5ª	48,3	35	7,27	35	48,7	40		
Fase C	1ª	450		83,7		164		96,8	
	3ª	99,7	74	13,6	61	53,5	70	23,6	81,4
	5ª	34,4	26	8,85	39	23,1	30	5,41	18,6

Fonte: Autoria Própria (2020).

As proporções das contribuições de cada ordem harmônica para o conteúdo harmônico a ser mitigado foram obtidas de acordo com relação entre as amplitudes das correntes harmônicas de 3ª e 5ª ordem. Por exemplo, observando o quadro 4, para a fase A da barra 32, tem-se:

$$3^{\text{a}} [\%] = \frac{67,7}{(67,7 + 58,3)} = 54 \%$$

$$5^{\text{a}} [\%] = \frac{58,3}{(67,7 + 58,3)} = 46 \%$$

A potência reativa total calculada inicialmente foi dividida entre as três fases da barra sob análise, sendo que, a terça parte de Q_C de cada fase foi dividida proporcionalmente entre os filtros de 3ª e 5ª ordem. Por exemplo, para o filtro de 3ª ordem a ser instalado na fase A da barra 32, o cálculo da potência reativa deu-se da seguinte maneira:

$$Q_{C,barra32_FaseA} = \frac{Q_{C_Total}}{3} \cdot 3^{\text{a}}[\%]_{fase A}$$

$$Q_{C,barra32_FaseA} = \frac{150320,567}{3} \cdot 0,54$$

$$Q_{C,barra32_FaseA} = 26,9225 \text{ [kVAr]}$$

Onde:

$Q_{C,barra32_FaseA}$: Potência Reativa da Fase A da Barra 32 [kVAr];

Q_{C_Total} : Potência Reativa Total da Barra 32 [kVAr];

$3^a[\%]_{fase A}$: Proporção da contribuição da componente harmônica de 3ª ordem para o conteúdo harmônico da Fase A da Barra 32.

Desse modo, calculou-se e distribuiu-se as potências reativas das fases ABC para os filtros de 3ª e 5ª ordem em cada uma das barras candidatas à instalação dos filtros. O Quadro 5 apresenta os valores das potências reativas utilizadas para o dimensionamento dos filtros em cada fase das barras 32, 71, 75 e 911.

Quadro 5 - Potência Reativas dos Filtros

Potências Reativas [kVAr]						
Barra nº	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
32	26,9225	32,5948	37,2534	23,1844	17,5120	12,8537
71	30,5905	30,8703	28,6977	16,7817	16,5019	18,6746
75	39,5072	47,8537	55,5981	40,0967	31,7504	24,0059
75 (c/ BC existente)	180,3440	209,5300	40800	119,6560	90,4700	16,7817
75 e 911 (c/ BC existente)	180,3440	209,5300	40800	119,6560	90,4700	16,7817
			40800			16,7817

Fonte: Autoria Própria (2020).

5.3 Dimensionamento dos Componentes dos Filtros

Para os cálculos dos componentes dos filtros foram considerados os resultados obtidos via simulação para cada um dos cenários apresentados no APÊNDICE B – Resultados Obtidos, as equações e as considerações apresentadas nos tópicos 3.3 e 3.4, sobre a Qualidade de Energia e Normativa Brasileira e Filtros, respectivamente. Foram dimensionadas as capacitâncias, as indutâncias e as resistências para as fases ABC de cada uma das barras candidatas à instalação dos filtros de 3ª e 5ª ordem.

Por exemplo, para o dimensionamento da capacitância, indutância e da resistência do filtro de 3ª ordem a ser instalado na fase A da barra 32, primeiramente calculou-se a reatância capacitiva por meio da equação 34:

$$X_C = \frac{V^2}{Q_C} \cdot \frac{h_r^2}{(h_r^2 - 1)} \quad (34)$$

$$X_C = \frac{2418,9029^2}{26922,49308} \cdot \frac{2,9^2}{(2,9^2 - 1)}$$

$$X_C = 246,6603732 [\Omega]$$

Onde:

V : Tensão Eficaz na Fase da Barra 32, vide quadro 16;

Q_C : Potência Reativa da Fase A da Barra 32, vide o quadro 5;

h_r : ordem harmônica de sintonia.

Em seguida, isolou-se a capacitância da equação 34 e foram atribuídos os valores das variáveis, para encontrar o valor do capacitor do filtro em questão.

$$C = \frac{(h_r^2 - 1)}{w \cdot V^2 \cdot h_r^2} \cdot Q_C$$

$$C = \frac{(2,9^2 - 1)}{377 \cdot 2418,9029^2 \cdot 2,9^2} \cdot 26922,49308$$

$$C = 10,7537 [\mu\text{F}]$$

Para calcular a Reatância Indutiva foi utilizada a equação 35, sendo que, foi utilizada a reatância capacitiva calculada na etapa anterior e a ordem harmônica de sintonia.

$$X_L = \frac{X_C}{h_r} = \frac{X_C}{(h - d)^2} \quad (35)$$

$$X_L = \frac{X_C}{h_r^2} = \frac{246,6603732}{2,9^2}$$

$$X_L = 29,3294 [\Omega]$$

Utilizando a equação 36 e do valor da reatância indutiva calculada, obteve-se o valor do indutor do filtro em questão.

$$L = \frac{X_L}{w} \quad (36)$$

$$L = \frac{29,3294}{377}$$

$$L = 77,7969 [mH]$$

Para encontrar o valor da resistência do filtro foi utilizada a equação 38 considerando a ordem harmônica de sintonia.

$$R = \frac{w \cdot L}{Q} \quad (38)$$

$$R = \frac{29,3294 \cdot 2,9}{30} = 2,835177[\Omega]$$

Conforme foi demonstrado, os valores dos componentes dos filtros de 3ª e 5ª ordem foram dimensionados para as fases ABC das barras 32, 71, 75 e 911 e estão apresentados no Quadro 6.

Quadro 6 - Componentes dos Filtros

Barra 32						
Componentes	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância [μ F]	10,7537	12,5732	15,2407	10,0726	7,3474	5,7197
Indutância [mH]	77,7969	66,5389	54,8928	29,0927	39,8832	51,2334
Resistência [Ω]	2,8351	2,4248	2,0004	1,7914	2,4558	3,1548
Barra 71						
Componentes	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância [μ F]	12,5544	11,5524	12,4946	7,4911	6,7169	8,8436
Indutância [mH]	66,6386	72,4184	66,9575	39,1181	43,6269	33,1357
Resistência [Ω]	2,4285	2,6391	2,4401	2,4087	2,6864	2,0403
Barra 75						
Componentes	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância [μ F]	16,4327	17,8366	24,3147	18,1403	12,8720	11,4191
Indutância [mH]	50,9111	46,9040	34,4074	16,1540	22,7656	25,6623
Resistência [Ω]	1,8553	1,7093	1,2539	0,9947	1,4018	1,5801
Barra 75 e Barra 911 (com BC Existente)						
Componentes	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância [μ F]	15564,85	16894,57	23030,6	17182,30	12192,21	10815,98
Indutância [mH]	7,6394	7,0381	5,1630	2,4240	3,4161	3,8507
Resistência [Ω]	0,738475	0,680352	0,499086	0,395914	0,557956	0,628950
Capacitância [μ F]			6795,5827			3040,2189
Indutância [mH]			17,4976			13,6994
Resistência [Ω]			1,6914			2,2376
Barra 75 (com BC Existente)						
Componentes	Filtro 3ª			Filtro 5ª		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Capacitância [μ F]	15564,85	16894,57	23030,6	17182,30	12192,21	10815,98
Indutância [mH]	7,6394	7,0381	5,1630	2,4240	3,4161	3,8507
Resistência [Ω]	0,738475	0,680352	0,499086	0,395914	0,557956	0,628950

Fonte: Autoria Própria (2020).

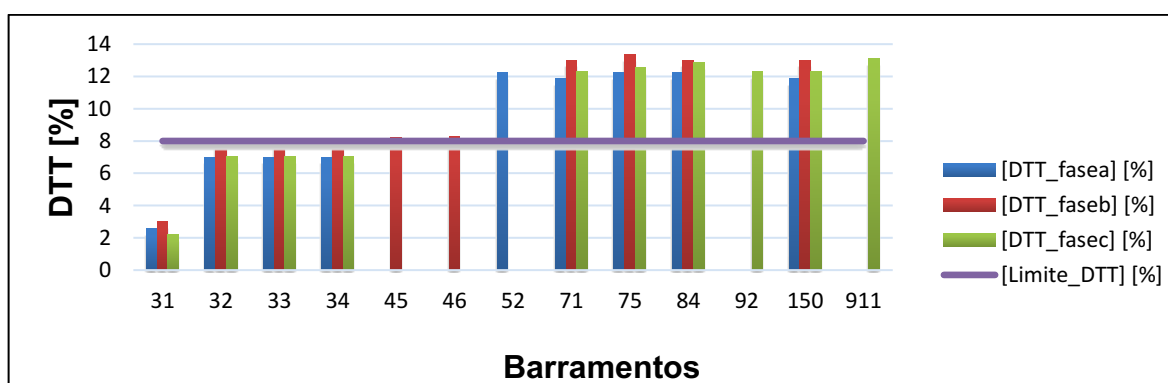
5.4 Resultados dos Diferentes Cenários

Após a realização dos dimensionamentos dos filtros eles foram modelados no ATPDraw e deu-se a simulação dos diferentes cenários de alocação dos filtros, desse modo, obteve-se os valores das grandezas elétricas e dos indicadores de distorção harmônicas para cada cenário. O APÊNDICE B – Resultados Obtidos apresenta os resultados com maiores detalhes para cada cenário, ou seja, os valores dos indicadores das taxas de distorções harmônicas de tensão e de corrente, o valor das tensões e correntes, as potências e os fatores de potência. A seguir serão apresentados graficamente os resultados pertinentes aos indicadores de distorção harmônica total de tensão (DTT, DTT₃, DTT_I, DTT_P) e os valores de fator de potência para cada um dos cenários.

5.4.1 Caso Base: Sistema sem Filtros

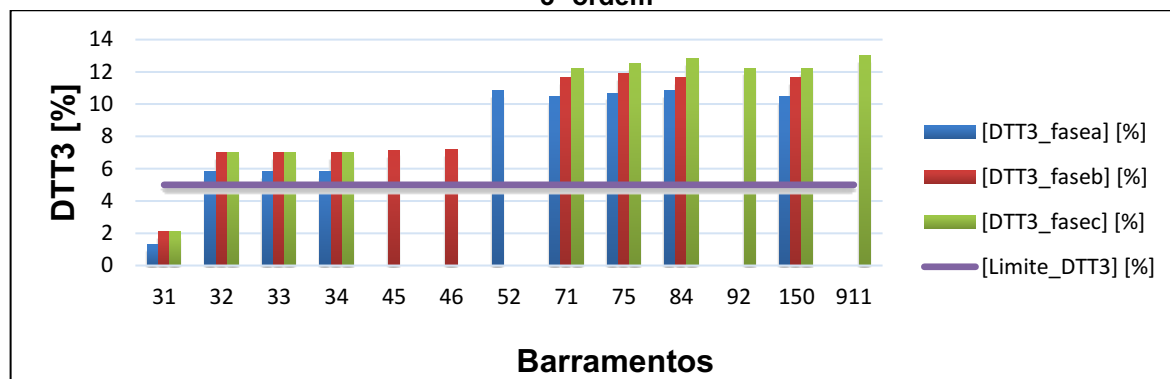
O caso base é aquele em que sistema se encontra sem a presença dos filtros e a partir do qual foram obtidas as informações dos barramentos do sistema e, principalmente, os dados das taxas de distorções harmônicas totais de tensão a serem ajustadas abaixo dos limites impostos no módulo 8 do PRODIST. As figuras 24, 25, 26 e 27, mostram os gráficos dos indicadores DTT, DTT₃, DTT_I, DTT_P para cada um dos 13 barramentos do sistema.

Figura 24 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão nos Barramentos



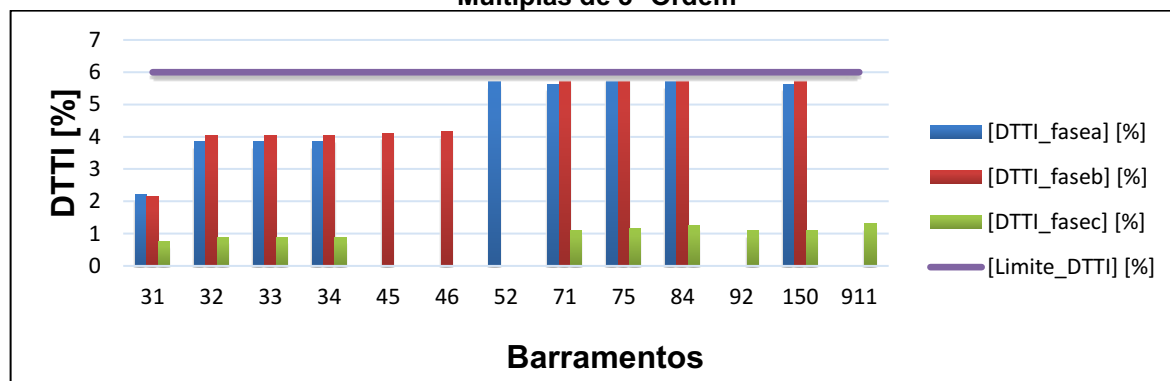
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 25 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª ordem



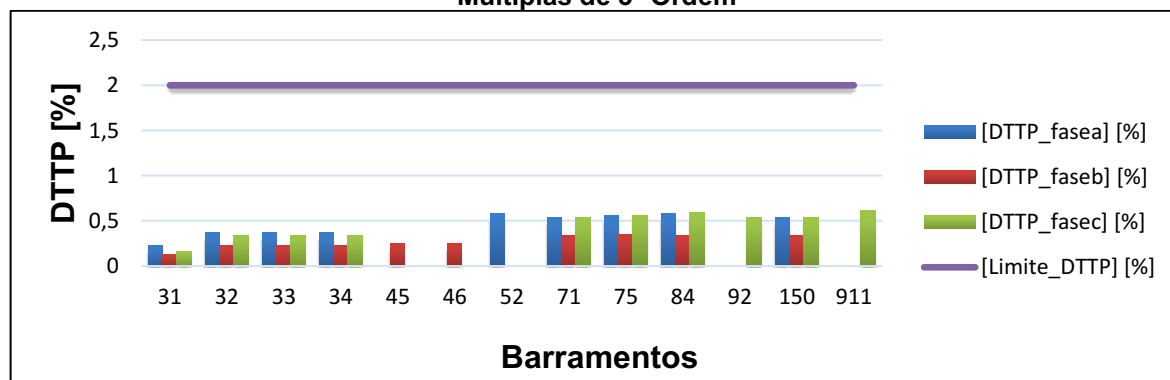
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 26 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 27 – Caso Base: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020)

Analisando os gráficos do caso base, constata-se que a maioria dos barramentos demonstram os indicadores DTT e DTT3 acima dos limites de 8% e 5%, respectivamente. As taxas do indicador DTTI está abaixo do limite de 6%, contudo, alguns barramentos apresentam taxas de distorções próximas ao mesmo. As taxas do indicador DTTP está bem abaixo do limite de 2%, sendo assim, não necessitam de mitigação.

O Quadro 7 apresenta os valores do fator de distorção, fator de potência da fundamental e o verdadeiro de cada um dos barramentos. Vale ressaltar que o impacto da instalação dos filtros a serem instalados nos barramentos 32, 71 e 75 nos casos em que os capacitores foram dimensionados, estes devem apresentar a compensação reativa local, porém, no tocante à mitigação harmônica deve ser sistêmico. Os valores de fator de potência fundamental maior e igual a 0,92 estão de acordo com o artigo 95 da resolução normativa 418/2010, do contrário, o mesmo encontra-se irregular e necessita de correção. O fator de distorção (FD) relaciona o fator de potência total ou verdadeiro com o fator de potência fundamental, ou seja, indica a quantidade de conteúdo harmônico existente, sendo que, o FD tende a zero quando o conteúdo harmônico tende ao infinito (16).

Quadro 7 – Caso Base: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro [FP_{Verdadeiro}]

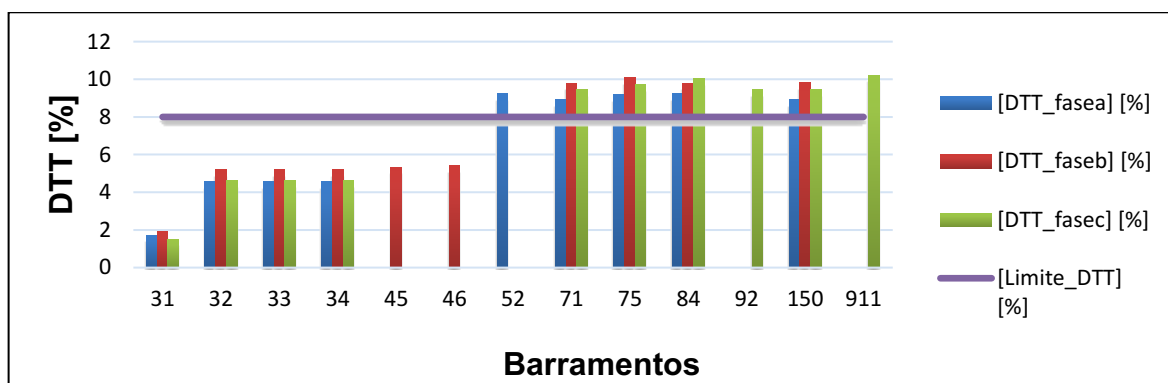
Barra nº	[FD]	[FP1]	[FP_{Verdadeiro}]
31	0,9768	0,9566	0,9344
32	0,9733	0,9634	0,9377
33	0,9984	0,9131	0,9116
34	0,9983	0,9099	0,9084
45	0,997	0,8063	0,8039
46	0,973	0,8676	0,8441
52	0,9749	0,8304	0,8096
71	0,9729	0,8676	0,844
75	0,9161	0,8958	0,8207
84	0,9677	0,9141	0,8845
92	0,9383	0,7478	0,7017
150	0,9995	1	0,9995
911	0,9605	0,9937	0,9544

Fonte: Autoria Própria (2020).

5.4.2 Cenário 1 - Filtros Instalados na Barra 32

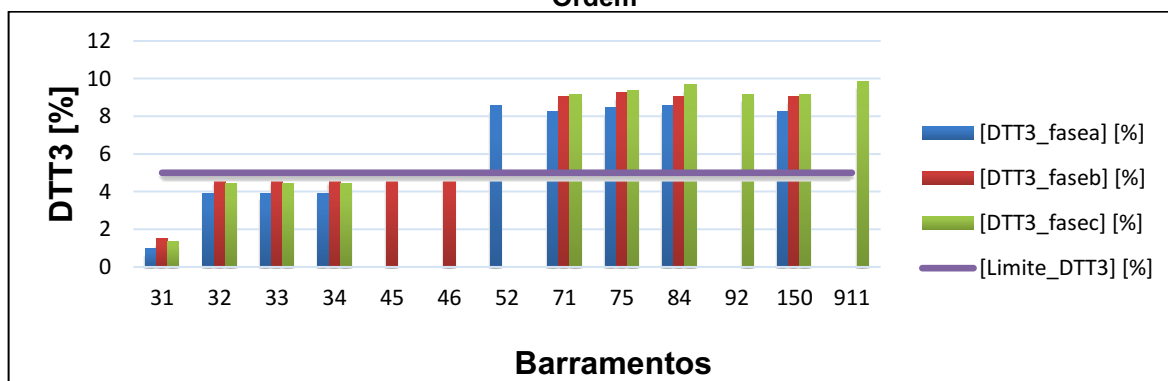
No cenário 1, os filtros de terceira e quinta ordem harmônica foram projetados e instalados na barra 32. Os resultados dos indicadores de distorção harmônica em cada um dos barramentos estão apresentados nos gráficos contidos nas Figuras 28, 29, 30 e 31. Além disso, o quadro 8 apresenta os valores de fator de potência da fundamental e verdadeiro, como também o fator de distorção em cada um dos barramentos do sistema sob análise.

Figura 28 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão



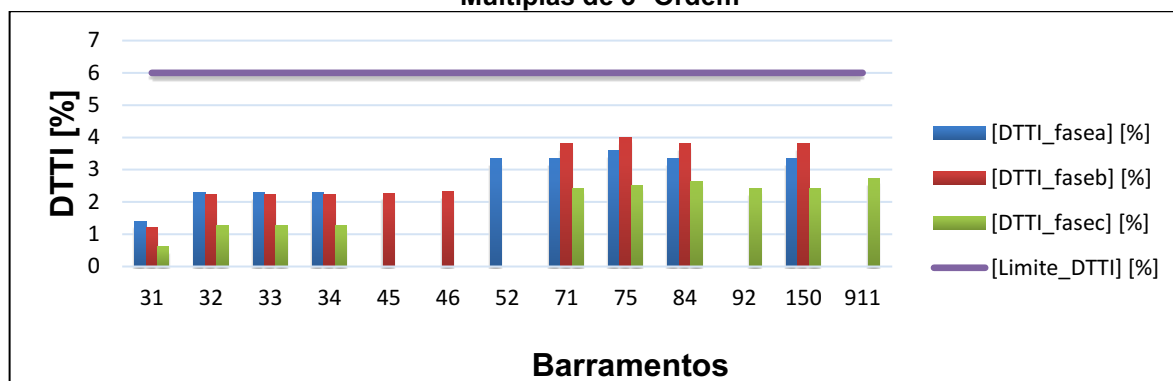
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 29 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem



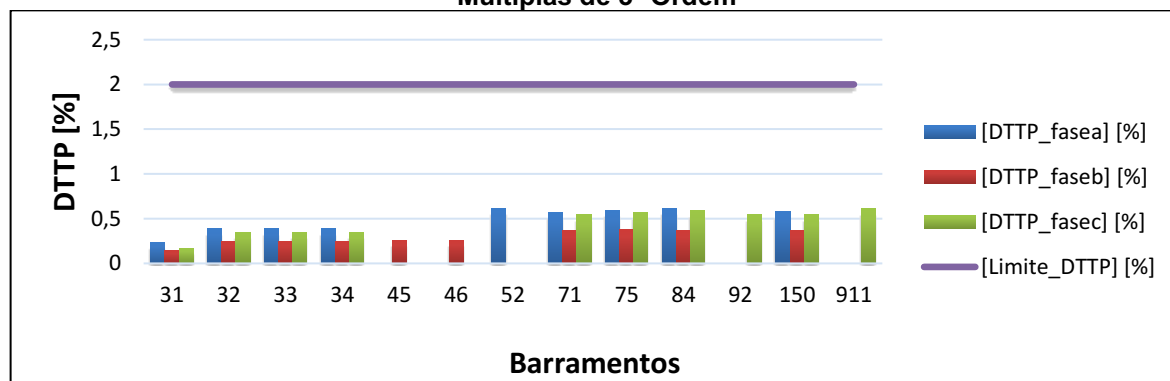
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 30 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 31 - Cenário 1: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 8 - Cenário 1: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro [FP_{Verdadeiro}]

Barra nº	[FD]	[FP1]	[FP _{Verdadeiro}]
31	0,9901	0,9744	0,9648
32	0,9886	0,9798	0,9686
33	0,9992	0,9131	0,9124
34	0,9992	0,91	0,9093
45	0,9983	0,8063	0,805
46	0,9731	0,8676	0,8442
52	0,9776	0,8305	0,8119
71	0,9738	0,8675	0,8448
75	0,9371	0,8956	0,8393
84	0,9726	0,9142	0,8891
92	0,9433	0,7476	0,7052
150	0,9995	1	0,9995
911	0,9676	0,9937	0,9616

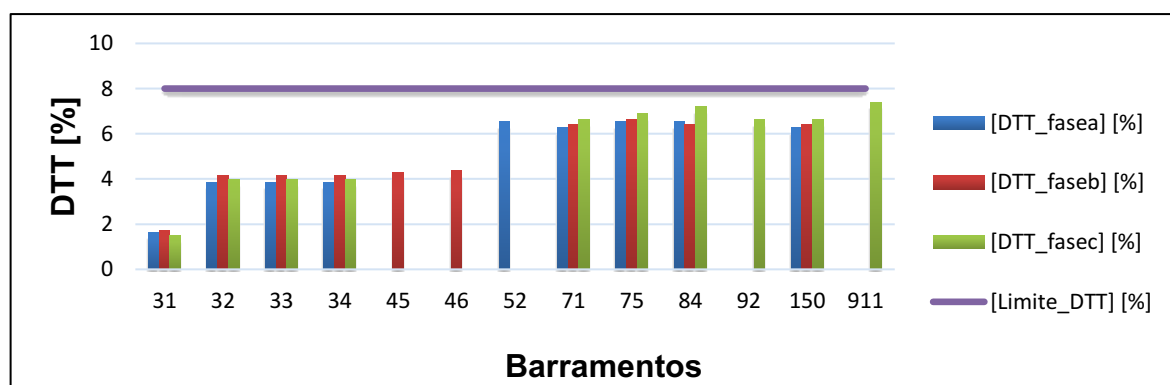
Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando os gráficos das figuras 24, 25, 26 e 27 do caso base com os gráficos da figura 28, 29, 30 e 31 do cenário 1, verifica-se que houve a redução das taxas de distorções harmônicas tanto local na barra 32, quanto a sistêmica, ou seja, nos demais barramentos do sistema. No entanto, a redução sistêmica não teve impacto suficiente para adequar os indicadores DTT e DTT3 nas barras 52, 71, 75, 84, 92, 150 e 911. O quadro 8 mostra que o fator de potência na barra 32 foi ajustado conforme o valor estipulado de 0,98.

5.4.3 Cenário 2 – Filtros Instalados na Barra 71

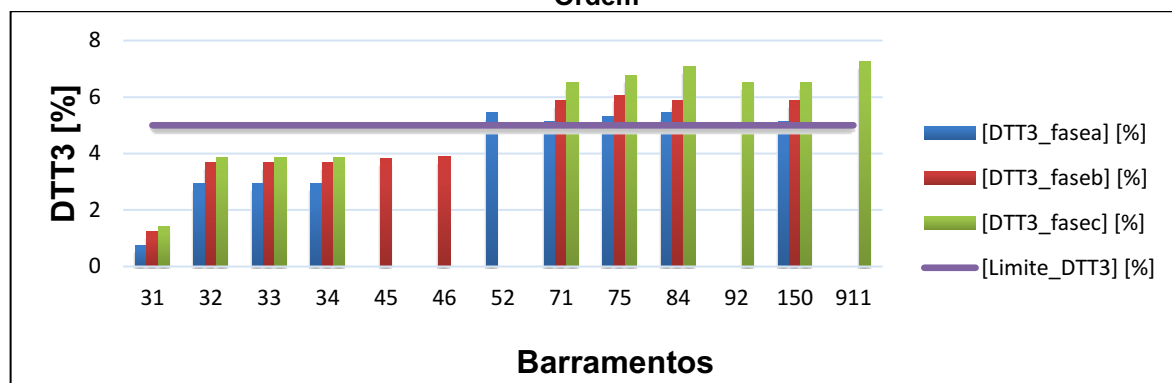
No cenário 2, os filtros de terceira e quinta ordem harmônica foram projetados e instalados na barra 71, sendo assim, os resultados dos indicadores de distorção harmônica em cada um dos barramentos estão apresentados nos gráficos contidos nas Figuras 32, 33, 34 e 35. Além disso, o quadro 9 apresenta os valores do fator de potência da fundamental e o verdadeiro, como também o fator de distorção em cada um dos barramentos do sistema sob análise.

Figura 32 - Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão



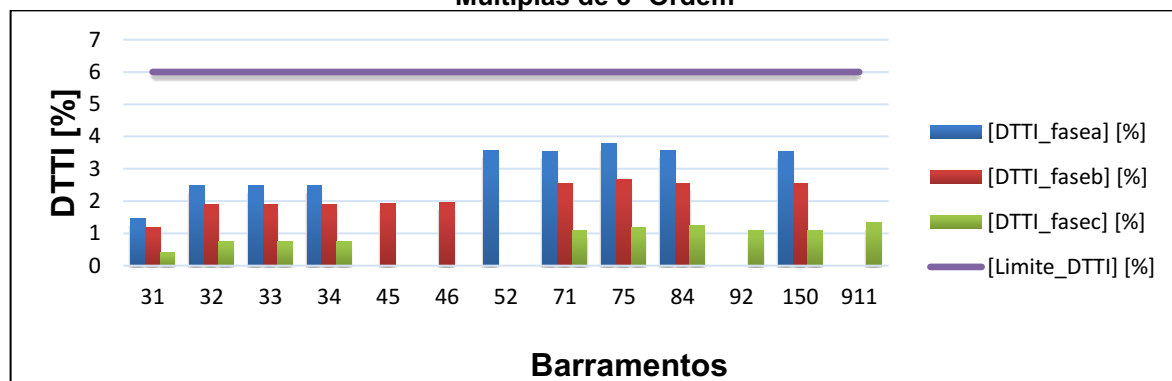
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 33 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem



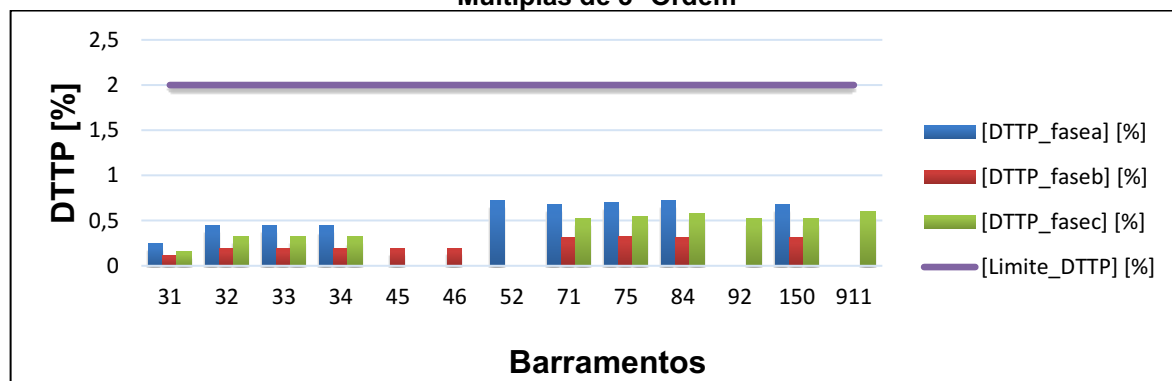
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 34 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 35 – Cenário 2: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 9 - Cenário 2: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro [FP_{Verdadeiro}]

Barra nº	[FD]	[FP1]	[FP_{Verdadeiro}]
31	0,9934	0,9737	0,9673
32	0,9925	0,9792	0,9718
33	0,9994	0,9131	0,9125
34	0,9994	0,91	0,9094
45	0,9986	0,8063	0,8052
46	0,9726	0,8676	0,8438
52	0,9787	0,8305	0,8127
71	0,9759	0,9799	0,9563
75	0,9556	0,8959	0,8562
84	0,9764	0,9141	0,8926
92	0,951	0,7478	0,7111
150	0,9995	1	0,9995
911	0,9743	0,9936	0,9681

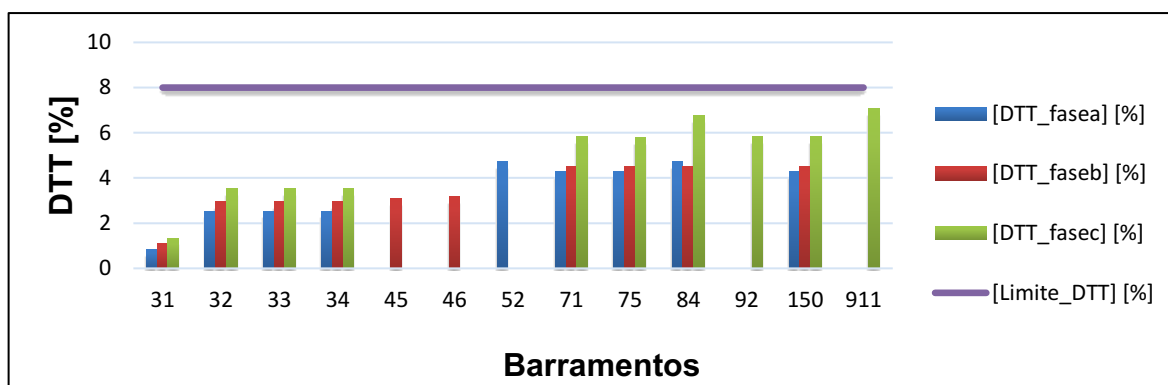
Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando os gráficos das figuras 28, 29 e 30 do cenário 1 com os gráficos da figura 32, 33 e 34 do cenário 2, verifica-se que além da redução das taxas de distorções harmônicas local na barra 71, houve também a redução sistêmica, de modo que foi ainda mais significativa do que a do cenário 1. Tal redução sistêmica das taxas de distorção harmônica de tensão pode ser visualizada principalmente nos indicadores DTT e DTTI, porém não teve impacto suficiente adequar as taxas do indicador DTT3 nas barras 52, 71, 75, 84, 92, 150 e 911. O quadro 9 mostra que o fator de potência na barra 71 foi ajustado conforme o valor determinado de 0,98.

5.4.4 Cenário 3: Filtros Instalados no Barramento 75

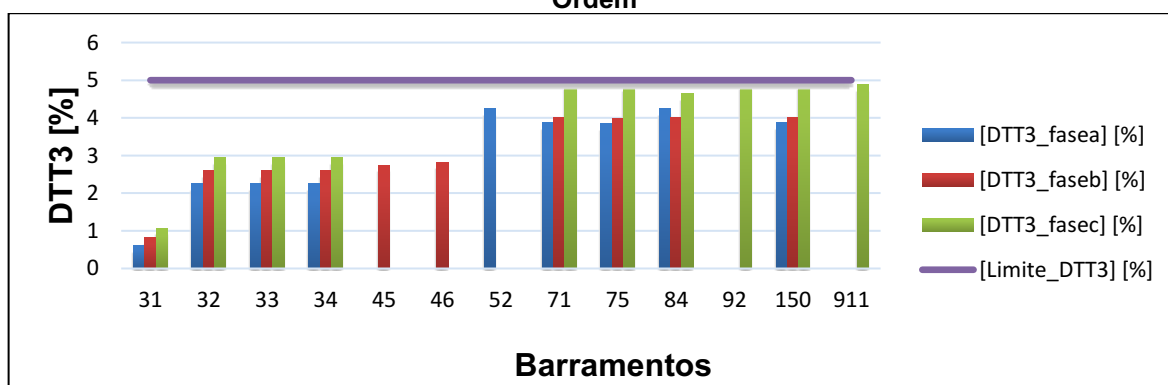
No cenário 3, os filtros de terceira e quinta ordem harmônica foram projetados e instalados na barra 75. Os resultados dos indicadores de distorção harmônica em cada um dos barramentos estão apresentados nos gráficos contidos nas Figuras 36, 37, 38 e 39. Além disso, o quadro 10 apresenta os valores de fator de potência da fundamental e verdadeiro, como também o fator de distorção em cada um dos barramentos do sistema sob análise.

Figura 36 - Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão



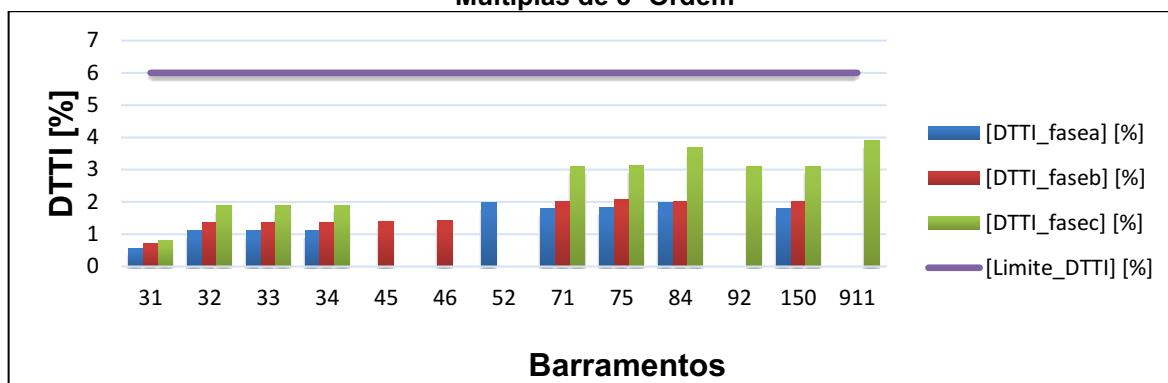
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 37 - Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem



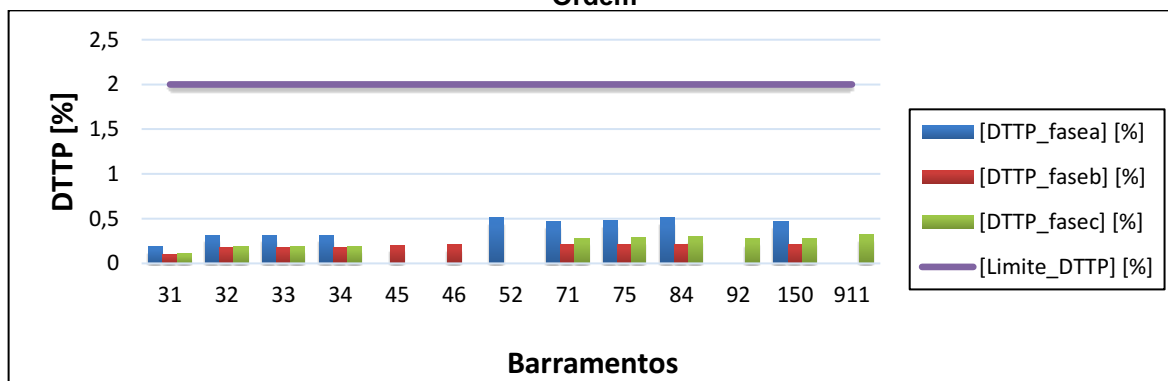
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 38 – Cenário 3: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 39 - Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 10 - Cenário 3: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro [FP_{Verdadeiro}]

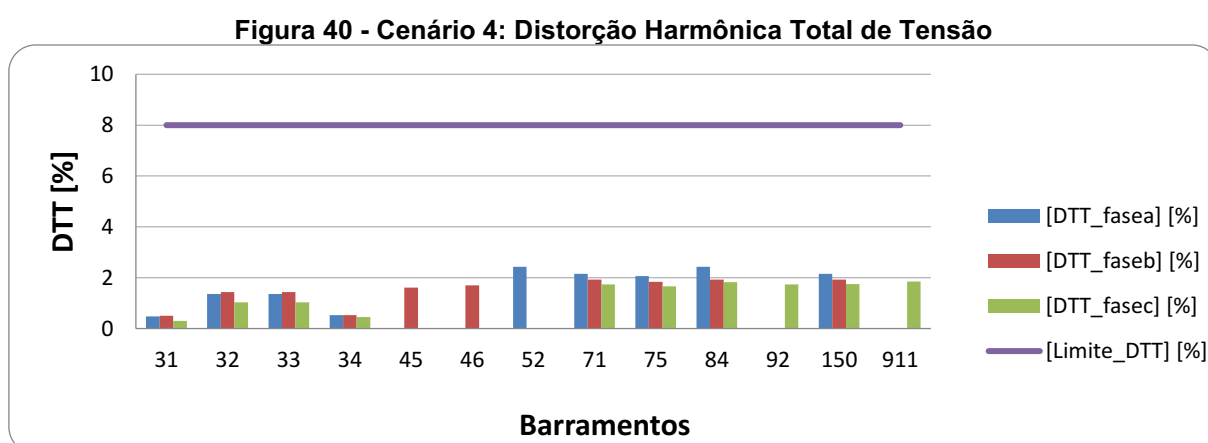
Barra nº	[FD]	[FP1]	[FP _{Verdadeiro}]
31	0,9973	0,9355	0,933
32	0,9968	0,9434	0,9404
33	0,9997	0,913	0,9128
34	0,9997	0,9099	0,9096
45	0,9991	0,8063	0,8056
46	0,9726	0,8676	0,8438
52	0,9808	0,8304	0,8145
71	0,9721	0,8676	0,8434
75	0,9954	0,951	0,9466
84	0,9727	0,9141	0,8891
92	0,9546	0,748	0,7141
150	0,9995	1	0,9995
911	0,9652	0,9936	0,959

Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando os gráficos das figuras 32, 33 e 34 do cenário 2 com os gráficos da figura 36, 37 e 38 do cenário 3, verifica-se que além da redução das taxas de distorções harmônicas local na barra 75, houve também a redução sistêmica, de modo mais significativa do que a do cenário 1 e 2. Tal redução sistêmica das taxas de distorção harmônica de tensão pode ser visualizada nos indicadores DTT, DTT3 e DTI em todas as barras do sistema.

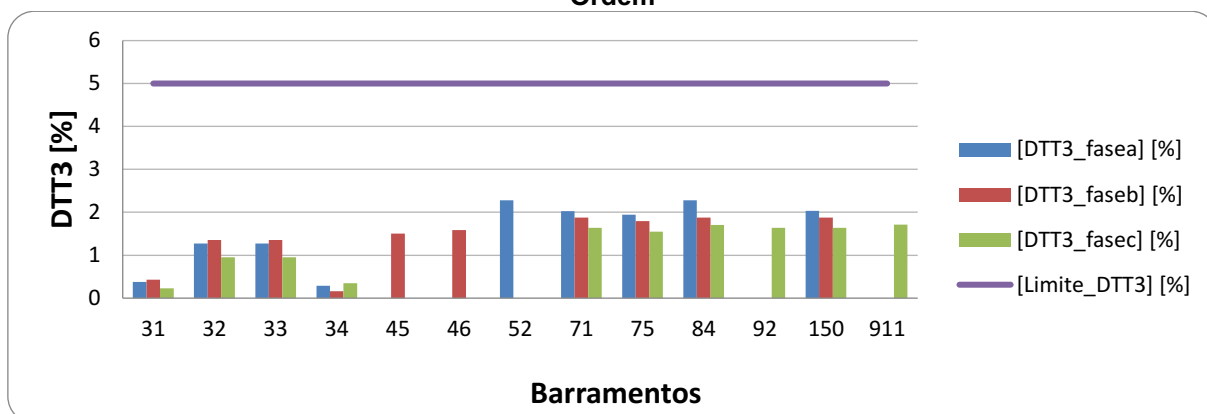
5.4.5 Cenário 4: Filtros Instalados no Barramento 75 e 911

No cenário 4, os filtros de terceira e quinta ordem harmônica foram projetados e instalados na barra 75 e 911, visando aproveitar os bancos de capacitores existentes nos mesmos. Desse modo, os resultados dos indicadores de distorção harmônica em cada um dos barramentos estão apresentados nos gráficos contidos nas Figuras 40, 41, 42 e 43. Além disso, o quadro 11 apresenta os valores de fator de potência da fundamental e o verdadeiro, como também o fator de distorção em cada um dos barramentos do sistema sob análise.



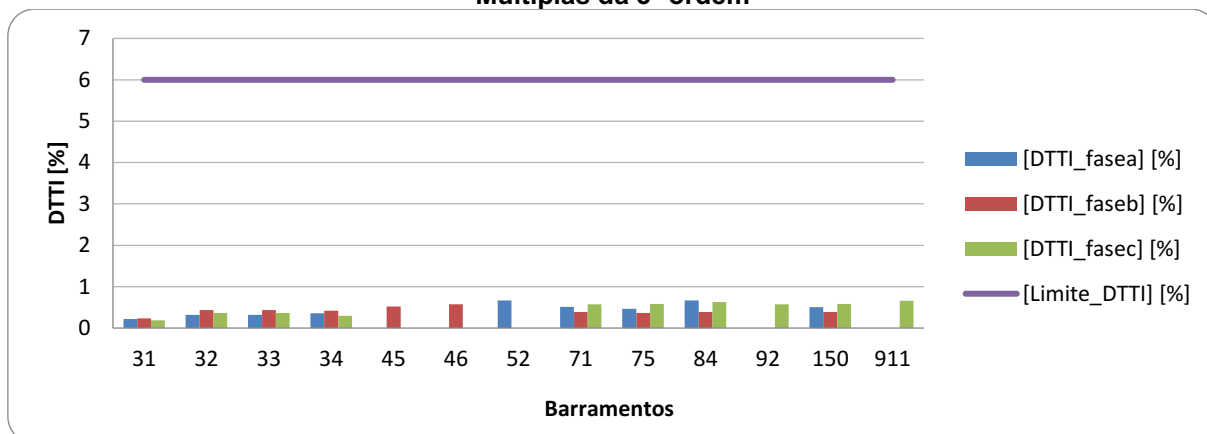
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 41 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem



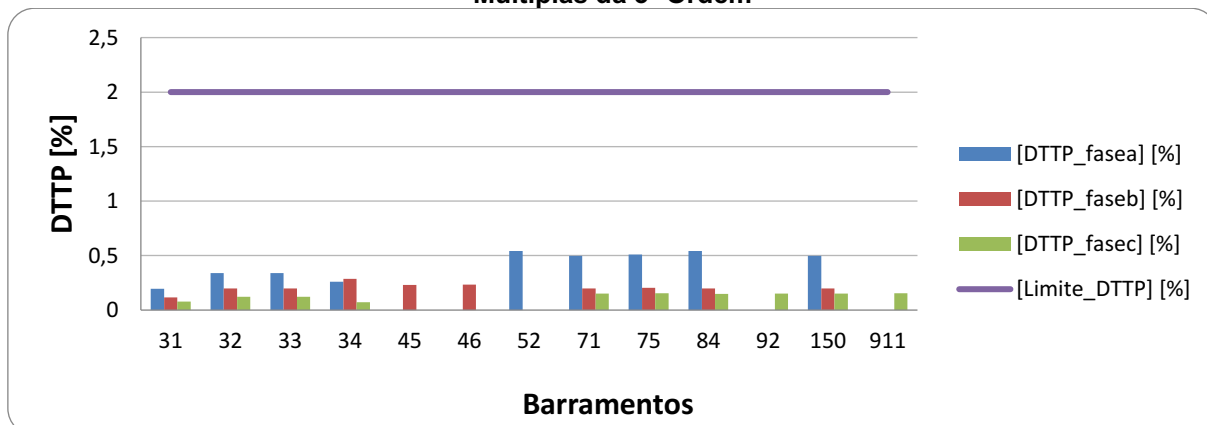
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 42 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares não Múltiplas da 3ª ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 43 - Cenário 4: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas da 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 11 - Cenário 4: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro [FP_{Verdadeiro}]

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]
31	0,9992	0,9523	0,9515
32	0,9986	0,9593	0,958
33	0,9993	0,7974	0,7968
34	0,9997	0,9099	0,9097
45	0,9988	0,8063	0,8053
46	0,9719	0,8676	0,8431
52	0,9827	0,8305	0,8161
71	0,9716	0,8675	0,8429
75	0,9939	0,9129	0,9074
84	0,9897	0,9139	0,9045
92	0,9584	0,7478	0,7167
150	0,9982	1	0,9982
911	0,9972	0,9946	0,9918

Fonte: Autoria Própria (2020).

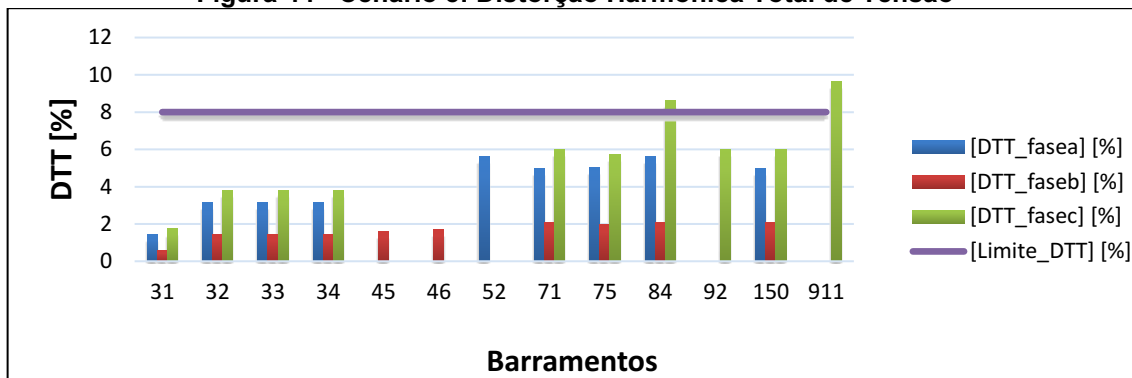
Comparando os gráficos das figuras 36, 37 e 38 do cenário 3 com os gráficos da figura 40, 41 e 42 do cenário 4, constata-se que a redução sistêmica das taxas de distorção harmônica de tensão do cenário 4 foram nitidamente mais impactantes do que as reduções provocadas no cenário 3. Nesse caso, não foi calculada a potência reativa, pois foi reaproveitada a potência reativa fornecidas pelos bancos de capacitores existentes nas barras 75 e 911. O cenário 3 é vantajoso, no entanto, o cenário 4 é mais vantajoso ainda, devido ao reaproveitamento dos BC's existentes.

5.4.6 Cenário 5: Filtros Instalados no Barramento 75 (Uso do BC Existente)

No cenário 5, os filtros de terceira e quinta ordem harmônica foram projetados e instalados na barra 75, visando aproveitar os bancos de capacitores existentes. Desse modo, os resultados dos indicadores de distorção harmônica em cada um dos barramentos estão apresentados nos gráficos contidos nas Figuras 44, 45, 46 e 47. Além disso, o quadro 11 apresenta os valores de fator de potência da fundamental e

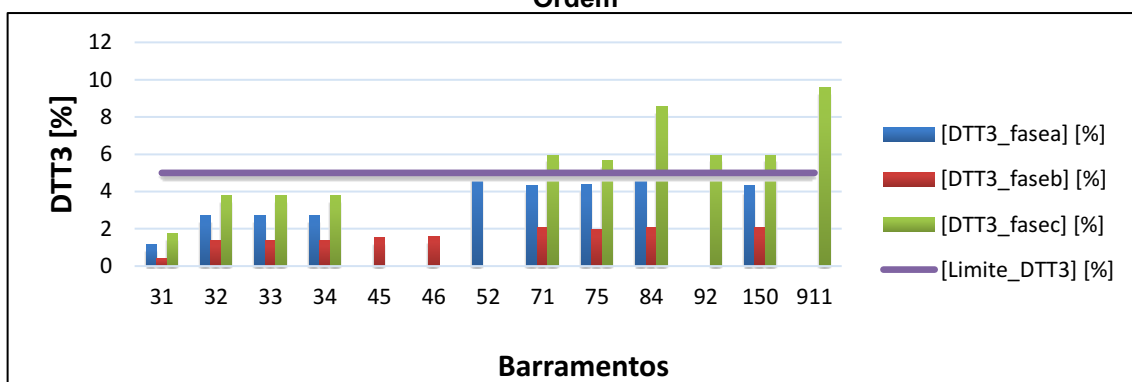
verdadeiro, como também o fator de distorção em cada um dos barramentos do sistema sob análise.

Figura 44 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão



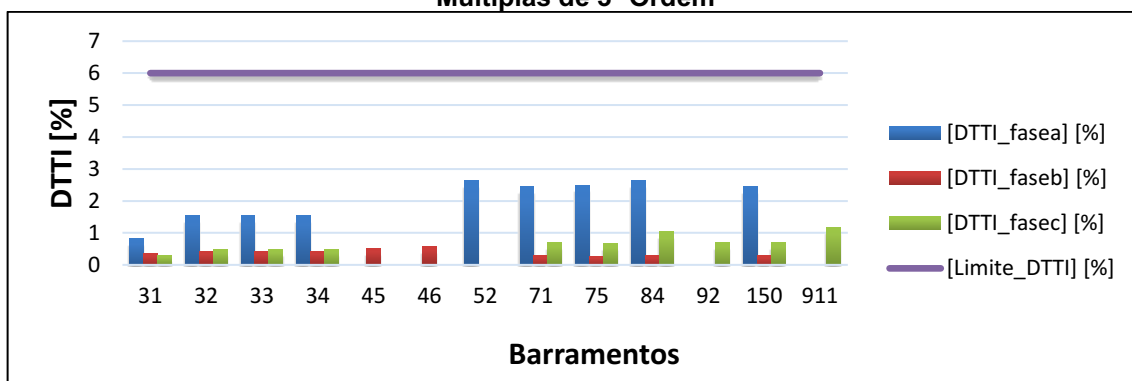
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 45 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Múltiplas de 3ª Ordem



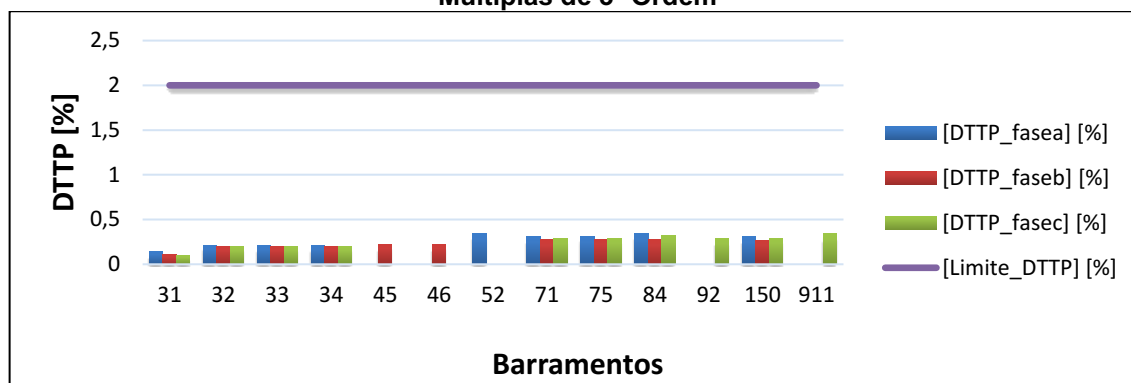
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 46 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Ímpares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 47 - Cenário 5: Distorção Harmônica Total de Tensão das Componentes Pares Não Múltiplas de 3ª Ordem



Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 12 - Cenário 5: Fator de Distorção [FD]; Fator de Potência Fundamental [FP1]; Fator de Potência Verdadeiro

Rótulos de Linha	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]
31	0,9972	0,945	0,9423
32	0,9964	0,9514	0,948
33	0,9994	0,9131	0,9126
34	0,9994	0,9099	0,9094
45	0,9991	0,8063	0,8055
46	0,9723	0,8675	0,8435
52	0,9811	0,8305	0,8148
71	0,9719	0,8676	0,8432
75	0,9833	0,8108	0,7973
84	0,9306	0,9197	0,8559
92	0,9598	0,7479	0,7178
150	0,9989	1	0,9989
911	0,8915	0,9937	0,8858

Fonte: Autoria Própria (2020).

Comparando os gráficos das figuras 40, 41 e 42 do cenário 4 com os gráficos da figura 44, 45 e 46 do cenário 5, constata-se que a redução sistêmica das taxas de distorção harmônica de tensão do cenário 4 foi mais impactante em todas as fases de todos os barramentos do sistema do que as reduções provocadas no cenário 5, pois nesse observa-se que a fase C dos barramentos 84 e 911 apresentam os indicadores DTT e DTT3 acima dos limites impostos.

Em suma, os resultados enfatizados na adequação dos índices das taxas de distorções harmônicas em todos os barramentos do sistema podem ser visualizados resumidamente na Figura 48. No caso dos filtros projetados e alocados na barra 32, 71 e 75, o melhor caso que se apresentou foi quando os filtros foram instalados na barra 75, porém nesse caso não aproveitou o banco de capacitores existentes. No caso em que foi aproveitado o BC existente na barra 75, alguns indicadores da Fase C permaneceram acima dos limites impostos. O melhor caso deu-se quando os filtros foram instalados nas barras 75 e 911 reaproveitando os capacitores existentes.

Figura 48 - Relatório Geral

Barra de Alocação	DTT ≤ 8%	DTT3 ≤ 5%	DTTI ≤ 6%	DTTP ≤ 6%
Sem Filtros	✗	✗	✗	✓
32	✗	✗	✓	✓
71	✓	✗	✓	✓
75	✓	✓	✓	✓
75 c/BC existente	✓	✗	✓	✓
75 e 911	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autoria Própria (2020).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dentre os diferentes distúrbios que provocam a deterioração da qualidade de energia elétrica, as distorções das formas de ondas provocadas pelas injeções de correntes harmônicas são comumente encontradas nos SEPs. Portanto, garantir a mitigação das harmônicas está diretamente relacionado em melhorar a qualidade da energia elétrica, a vida útil dos componentes e elementos que o constituem, bem como a eficiência e o desempenho operacional do sistema.

A mitigação das harmônicas pode ser realizada com o emprego de diferentes técnicas, sendo que, dentre elas destacam-se o emprego dos filtros harmônicos: passivos, ativos e híbridos. Nesse trabalho o enfoque foi dado ao filtro passivo sintonizado devido ao seu maior emprego, menor custo financeiro e simplicidade em relação aos demais. No entanto, observou-se que os filtros passivos sintonizados exigem enorme atenção quanto ao seu dimensionamento e alocação em um SEP, pois eles demandam domínio e ciência de conceitos, considerações e cálculos fundamentais e específicos como foi demonstrado na fundamentação teórica, identificados durante as etapas de modelagem, simulação e do tratamento dos dados e constatados na análise e no parecer técnico dos resultados.

Conclui-se que o objetivo principal deste trabalho de estudar e analisar sob o ponto de vista sistêmico, os impactos causados pela instalação de filtros passivos em diferentes barramentos de um SEP, com a finalidade de adequar as taxas de distorções harmônicas totais de tensão, conforme com os limites impostos pela ANEEL, foi alcançado com êxito. Além disso, constatou-se que para este tipo de problema faz-se necessária a abordagem de otimização restrita devido à complexidade que envolvem os diversos fatores relacionados ao dimensionamento e alocação do filtro, como também, a quantidade de barramentos e as características do sistema elétrico de potência a ser estudado e analisado.

Analisando os fatores de distorções dos barramentos dos diferentes cenários apresentados nos quadros 8, 9 e 10, verifica-se que alguns encontram-se mais distantes do valor unitário do que outros, principalmente aqueles barramentos que possuem as maiores fontes de injeções de correntes harmônicas. Portanto, para se ter um melhor refinamento e uma melhor eficácia no que se refere à mitigação harmônica é extremamente necessário utilizar diferentes ferramentas de otimização

dos parâmetros construtivos e de alocação dos filtros passivos, como apresenta as obras (4), (6) e (26). Além disso, pode-se utilizar de outras técnicas de mitigação como por exemplo, os filtros ativos, e ainda mesclar as diferentes ferramentas de otimização com as diferentes técnicas de mitigação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 IEA. **World Energy Outlook**, 2017. Disponível em: <<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>>. Acesso em: 28 jul. 2020.
- 2 FESTA, A. et al. Eficiência Energética e Qualidade de Energia com a Automação Condicionadores de Ar. **O Setor Elétrico**, p. 112-118, jun. 2011.
- 3 CHANG, G. W.; CHU, S. Y.; WANG, H. L. Article - Proceedings of the 2002 IEEE PES Winter Meeting. **Sensitivity-Based Approach for Passive Harmonic Filter Planning in a Power System**, New York, January 2002.
- 4 GUIASI, M.; RASHTCHI, V.; HOSEINI, S. H. **Optimum location and sizing of passive filters in distribution networks using genetic algorithm**. Conference Paper - Proceedings - 4th IEEE International Conference on Emerging Technologies. [S.l.]: ICET 2008. p. 162-166.
- 5 ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**. Brasília,DF: [s.n.], 2018.
- 6 DA SILVA, M. P. C.; LEBORGNE, R. C.; BARROZO, V. **Análise de Alocação de Filtros para Mitigação de Distorção Harmônica em Sistemas Elétricos de Distribuição**. Conference Paper - The 12th Latin-American Congress on Electricity Generation and Transmission. [S.l.]: Nov. 2017. p. 1-7.
- 7 KIENITZ, K. H. **Análise de Circuitos - Um Enfoque de Sistemas**. 2^a. ed. São José dos Campos: [s.n.], 2010.
- 8 ALEXANDER, K.; SADIKU, M. N. O. Fundamentos de Circuitos Elétricos. In: ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5^a. ed. Porto Alegre - RS: AMGH Editora Ltda, 2013. Cap. Conceitos Básicos, p. 3-12;112-113;466-480;545-571.
- 9 SANCHEZ, P. L. P. Edisciplinas USP. **Práticas de Eletricidade e Eletrônica**, São Paulo, 2016. Disponível em:

<https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/475521/mod_resource/content/1/3263Exp1_2016.pdf>. Acesso em: 29 jun. 2020.

10 LUQUETA, G. R. Eletrônica Analógica. **Curso Básico de Eletrônica Analógica**. Disponível em: <<http://www.epsinfo.com.br/eletronica.pdf>>. Acesso em: 29 jul. 2020.

11 GRID ENERGY. GRID ENERGY-Sistemas e Equipamentos. **Compensação Reativa**, Araraquara-SP, 2020. Disponível em: <<https://gridse.com.br/areas-de-negocios/compensacao-reativa/>>. Acesso em: 29 jun. 2020.

12 NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Cálculos de Potência em Regime Permanente Senoidal. In: NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, v. Único, 2008. Cap. 10, p. 272-291.

13 ROCHA, J. E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 1-37. 2016.

14 POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS. In: POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. **Distúrbios em frequência**. Campinas-SP: [s.n.], 2009. p. 1-51.

15 POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS. In: POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. **Teorias de Potência Elétrica**. Campinas: [s.n.], 2009. Cap. 6, p. 1-64.

16 IEEE. IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000). **IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions**, New York, 19 mar. 2010. p.1-50.

17 , K. N. **Valor Médio e Eficaz**. Universidade Federal de Itajubá. Itajubá-MG, p. 1-12. 2013.

18 PIRES, R. A. **Estudo do Fator de Potência e do Fator de Deslocamento em Unidade Consumidora de Baixa Tensão**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, p. 1-81. 2014.

19 ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Qualidade de Distribuição**, 2016. Disponível em: <<https://www.aneel.gov.br/qualidade-na-distribuicao>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

20 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº414/2010**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília-DF, p. 1-37. 2010.

21 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº418/2010. **LEGISWEB- Informação Rápida e Confiável**, 2010. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=112865>>. Acesso em: 04 ago. 2020.

22 ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. Resposta de Frequência. In: ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª. ed. Porto Alegre-RS: AMGH Editora Ltda, 2013. Cap. 14, p. 545-571.

23 NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. Introdução aos Circuitos de Seleção de Frequência. In: NILSSON, J. W.; RIEDEL, S. A. **Circuitos Elétricos**. 8ª. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, v. Único, 2008. Cap. 14, p. 388-410.

24 ESCELSA, J. R. M. J. et al. **Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários**. II Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica. [S.l.]: [s.n.]. 2003. p. 845-852.

25 SARTORI, G. P.; DA SILVA, K. O. A. B. **Análise e Projeto de Filtros Passivos para Mitigação de Harmônicas em Sistemas Residenciais**. Universidade do Sul de Santa Catarina. Palhoça, p. 1-111. 2013.

26 DA SILVA, M. P. C. **Metodologia para Alocação de Filtros para Mitigação de Distorção Harmônica em Sistemas de Distribuição**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, p. 1-143. 2019.

27 BONELLI, A. F. et al. **Análise do Impacto de Dessintonias em Filtros Harmônicos Passivos**. XII CBQEE – Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica. Curitiba: [s.n.]. 2017.

- 28 ROCHA, J. E. **Projeto de Filtro Harmônico**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 1-30. 2019.
- 29 DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. Filtros Ativos e Passivos. In: DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Campinas: UNICAMP/FEEC/DSCE, 2009. Cap. 7, p. 1-48.
- 30 ESCELSA, J. R. M. J. et al. **Projeto e instalação de filtros harmônicos passivos em redes**. XVIII Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica. Olinda-PE: [s.n.]. 2008. p. 1-12.
- 31 SHI, Q. et al. Passive Filter Installation for Harmonic Mitigation in Residential Distribution Systems. **IEEE POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING**, Chicago, 2018. p. 1-5.
- 32 PEREIRA, H. A.; PRATES, M. D. O. **Mitigação de harmônicos**. Universidade Federal de Viçosa-UFV. Viçosa, p. 1-44. 2019.
- 33 ATPDRAW. **ATPDraw-The Graphical preprocessor to ATP Electromagnetic Transients Program**, 1995-2015. Disponível em: <<https://www.atpdraw.net/>>. Acesso em: 10 ago. 2020.
- 34 PRIKLER, L.; HOIDALEN, H. K. **ATPDRAW version 5.6 for Windows**. Budapest: [s.n.], 2009.
- 35 IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY. **Test Systems for Harmonics Modeling and Simulation**. IEEE Transmission and Distribution Committee. [S.l.], p. 1-7.
- 36 CHAVES, F. F.; DIAS, R. A. **Ensino do fator de potência na presença de harmônicos: uma abordagem sociointeracionista**. Congresso de Iniciação Científica da Unesp. [S.l.]: [s.n.]. 2020. p. 1.
- 37 GHESSI, L. A. **Análise Automatizada das Tensões Trifásicas em Sistemas de Distribuição no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 1-104. 2012.

APÊNDICE A – Dimensionamento dos Filtros

Quadro 13 - Dimensionamentos dos Filtros das Barras 32, 71 e 75

Barra 32						
Filtro Ordem	3^a			5^a		
Fases	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Q_{Banco} [VAr]	26922,49308	32594,83592	37253,19544	23184,36258	17512,01974	12853,66021
h_R	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Reatância Efetiva [Ω]	217,330959	185,8809856	153,3467489	252,3723143	345,9772382	444,4381064
Reatância Capacitiva [Ω]	246,6603732	210,9661388	174,0413168	263,340255	361,0131894	463,7531045
Capacitância [μF]	10,7537	12,5732	15,2407	10,0726	7,3474	5,7197
Admitância Capacitiva [μS]	4054,1575	4740,0972	5745,7621	3797,3685	2769,9819	2156,3198
Indutância [mH]	77,7969	66,5389	54,8928	29,0927	39,8832	51,2334
Reatância Indutiva [Ω]	29,3294	25,0852	20,6946	10,9679	15,0360	19,3150
Fator de Qualidade	30	30	30	30	30	30
Resistência [Ω]	2,835177	2,424898	2,000475	1,791430	2,455872	3,154783
Ordem Ressonância	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Frequência de Ressonância [Hz]	174,0040993	174,0040993	174,0040993	294,0069264	294,0069264	294,0069264
Barra 71						
Filtro Ordem	3^a			5^a		
Fases	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Q_{Banco} [VAr]	30590,5264	30870,2605	28697,6542	16781,7043	16501,9701	18674,5764
h_R	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Reatância Efetiva [Ω]	186,1596	202,3058	187,0505	339,3409	378,4537	287,4448

Reatância Capacitiva [Ω]	211,2823	229,6075	212,2935	354,0885	394,9011	299,9370
Capacitância [μF]	12,5544	11,5524	12,4946	7,4911	6,7169	8,8436
Admitância Capacitiva [μS]	4733,0041	4355,2581	4710,4605	2824,1531	2532,2796	3334,0336
Indutância [mH]	66,6386	72,4184	66,9575	39,1181	43,6269	33,1357
Reatância Indutiva [Ω]	25,1227	27,3017	25,2430	14,7475	16,4474	12,4922
Fator de Qualidade	30	30	30	30	30	30
Resistência [Ω]	2,4285	2,6392	2,4402	2,4088	2,6864	2,0404
Ordem Ressonância	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Frequência de Ressonância [Hz]	174,0041	174,0041	174,0041	294,0069	294,0069	294,0069
Barra 75						
Filtro Ordem	3^a			5^a		
Fases	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Q_{Banco} [VAr]	39507,2	47853,7	55598,1	40096,9	31750,4	24005,9
h_R	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Reatância Efetiva [Ω]	142,2237	131,0297	96,1194	140,1322	197,4862	222,6142
Reatância Capacitiva [Ω]	161,4172	148,7125	109,0910	146,2222	206,0688	232,2889
Capacitância [μF]	16,4327	17,8366	24,3147	18,1403	12,8720	11,4191
Admitância Capacitiva [μS]	6195,1281	6724,3857	9166,6593	6838,9062	4852,7483	4304,9839
Indutância [mH]	50,9111	46,9040	34,4074	16,1540	22,7656	25,6623
Reatância Indutiva [Ω]	19,1935	17,6828	12,9716	6,0901	8,5826	9,6747
Fator de Qualidade	30	30	30	30	30	30
Resistência [Ω]	1,8554	1,7093	1,2539	0,9947	1,4018	1,5802
Ordem Ressonância	2,9	2,9	2,9	4,9	4,9	4,9
Frequência de Ressonância [Hz]	174,0041	174,0041	174,0041	294,0069	294,0069	294,0069

Fonte: Autoria Própria (2020).

APÊNDICE B – Resultados Obtidos

I. CASO BASE – SEM FILTROS INSTALADOS

Quadro 14 - Caso Base: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra n°	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT _i [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	2,588	3,0156	2,2235	1,3292	2,1085	2,0813	2,2091	2,1519	0,7646	0,2254	0,1312	0,1663
32	7,0073	8,0898	7,0539	5,8347	6,9999	6,9891	3,8632	4,0487	0,8919	0,3658	0,2304	0,3379
33	7,0075	8,09	7,0544	5,8353	7,0003	6,9896	3,8627	4,0486	0,892	0,3662	0,2303	0,3383
34	7,0072	8,0901	7,0544	5,8351	7,0003	6,9896	3,8624	4,0486	0,892	0,3662	0,2303	0,3383
45		8,2215			7,1124			4,1165			0,2458	
46		8,3082			7,1874			4,1602			0,2465	
52	12,257			10,8257			5,7181			0,5836		
71	11,8834	13,0117	12,2995	10,4491	11,6261	12,2385	5,6339	5,8329	1,0981	0,5388	0,3404	0,5414
75	12,2328	13,3301	12,5556	10,6836	11,8729	12,4904	5,932	6,0502	1,1477	0,5579	0,349	0,561
84	12,257	13,0117	12,8829	10,8257	11,6261	12,8093	5,7181	5,8329	1,243	0,5836	0,3404	0,5884
92			12,2995			12,2385			1,0981			0,5414
150	11,885	13,0128	12,2966	10,4523	11,6275	12,2355	5,6311	5,8325	1,0985	0,5415	0,3409	0,5393
911			13,0861			13,0058			1,3122			0,6096

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 15 - Caso Base: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Barra nº	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC ₁ [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	16,2124	30,1759	19,0242	12,602	26,4051	18,7074	10,125	14,5706	3,3124	1,231	1,026	0,9901
32	16,212	30,1753	19,0239	12,6019	26,4047	18,7071	10,1245	14,57	3,3122	1,231	1,026	0,9901
33	4,1097	8,09	7,0544	3,7662	7,0003	6,9896	1,635	4,0486	0,892	0,1794	0,2303	0,3383
34	4,1094	8,0901	7,0544	3,766	7,0003	6,9896	1,6347	4,0486	0,892	0,1793	0,2303	0,3383
45		4,5983		5,8316	4,078	6,9936	3,8691	1,2505	0,8973	0,3672	1,7176	0,3325
46		20,0191		5,8352	18,6469	7,0113	3,8629	7,2823	0,9028	0,3623	0,1538	0,3311
52	12,4979			10,8747	11,6263	12,8094	5,8077	5,8328	1,243	2,052	0,3404	0,5884
71	20,4676	17,9346	18,0023	18,0273	16,0164	15,9115	9,4263	7,763	8,0369	2,2551	2,2043	2,5129
75	18,052	85,7467	29,3243	12,639	71,5533	28,5176	12,8551	47,2023	6,5445	0,9361	2,1385	1,9567
84	12,4979	37,7491	25,3845	10,8747	26,9886	24,57	5,8076	26,365	5,9984	2,052	1,2234	2,1692
92			23,9649	10,4491	11,6261	19,9493	5,6339	5,8329	13,253	0,5388	0,3404	0,837
150	11,885	13,0128	12,2966	10,4524	11,6275	12,2355	5,6311	5,8325	1,0985	0,5415	0,3409	0,5393
911			25,3845	10,8191	11,6843	24,5701	5,7204	5,8336	5,9984	0,5738	0,3458	2,1692

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 16 - Caso Base: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra n°	[Ia_rms] [A]	[Ia_rms1] [A]	[Ib_rms] [A]	[Ib_rms1] [A]	[Ic_rms] [A]	[Ic_rms1] [A]	[Va_rms] [V]	[Va_rms1] [V]	[Vb_rms] [V]	[Vb_rms1] [V]	[Vc_rms] [V]	[Vc_rms1] [V]
31	323,4931	319,3237	236,1869	226,1162	324,1943	318,4823	2456,9408	2456,0115	2470,9612	2469,8076	2455,8724	2455,1977
32	323,495	319,3258	236,1877	226,1173	324,1969	318,485	2425,1736	2419,0853	2469,4512	2461,3846	2396,0704	2390,0808
33	0,2675	0,2673	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	2425,2271	2419,0702	2469,4701	2461,385	2396,085	2390,078
34	2,2994	2,2975	0	0	0	0	279,8028	279,0925	284,9379	284,005	276,4705	275,7774
45	0	0	89,516	89,4215	0	0	2425,1736	2419,0853	2447,4966	2439,0912	2401,697	2395,4305
46	0	0	38,0821	37,3412	0	0	2425,1736	2419,0853	2443,902	2435,2575	2402,8543	2396,4103
52	63,8716	63,3785	0	0	0	0	2393,7776	2374,1652	2520,1785	2499,0132	2323,6623	2304,5807
71	62,2551	60,9907	64,885	63,866	60,1592	59,2075	2403,4977	2386,4437	2520,1637	2499,0185	2334,4259	2316,8027
75	203,0096	199,7801	88,7745	67,3915	121,1825	116,2855	2388,249	2370,5782	2526,1668	2504,0176	2329,805	2311,6554
84	63,8716	63,3785	0,0459	0,0027	70,596	68,4258	2393,7775	2374,1651	2520,1637	2499,0185	2323,6641	2304,5809
92	0	0	0	0	31,3911	30,5268	2403,4977	2386,4437	2520,1637	2499,0185	2334,4259	2316,8027
150	0	0	0	0	0	0	2404,0721	2386,5139	2520,4609	2498,9866	2334,8767	2316,7956
911	0	0	0	0	70,5955	68,4253	2393,7775	2374,1651	2519,0971	2497,7667	2319,6616	2300,0515

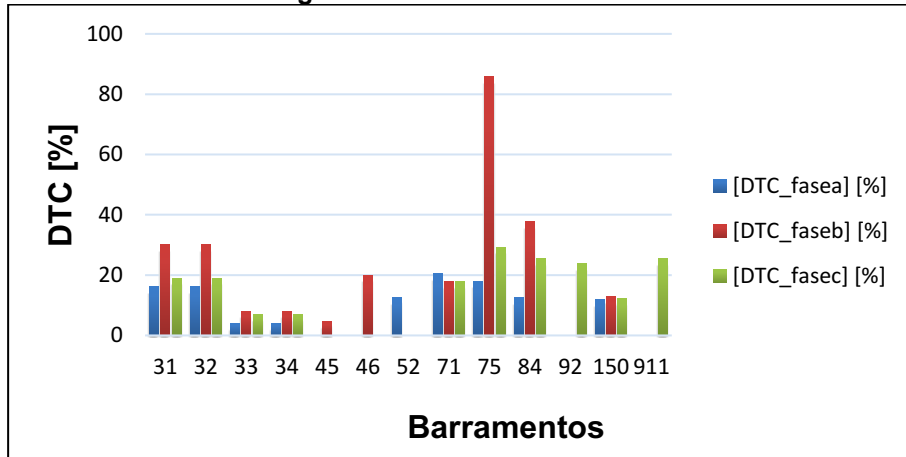
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 17 - Caso Base: Fatores de Potência, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9768	0,9566	0,9344	2031,97	2032,49	774,56	617,74	2174,59	2124,66
32	0,9733	0,9634	0,9377	2011,05	2013,84	744,93	558,46	2144,58	2090,24
33	0,9984	0,9131	0,9116	0,6	0,6	0,27	0,27	0,66	0,66
34	0,9983	0,9099	0,9084	0,58	0,58	0,27	0,27	0,64	0,64
45	0,997	0,8063	0,8039	176,12	175,86	130,32	129,01	219,09	218,11
46	0,973	0,8676	0,8441	78,56	78,89	49,9	45,23	93,07	90,94
52	0,9749	0,8304	0,8096	123,78	124,96	89,75	83,83	152,89	150,47
71	0,9729	0,8676	0,844	382,83	383,74	243,27	219,99	453,59	442,33
75	0,9161	0,8958	0,8207	813,62	816,19	566,53	-150,52	991,43	911,16
84	0,9677	0,9141	0,8845	280,45	281,7	147,89	66,52	317,05	308,17
92	0,9383	0,7478	0,7017	51,42	52,89	52,21	46,96	73,28	70,72
150	0,9995	1	0,9995	0	0	0	0	0	0
911	0,9605	0,9937	0,9544	156,29	156,39	48,89	-17,66	163,76	157,38

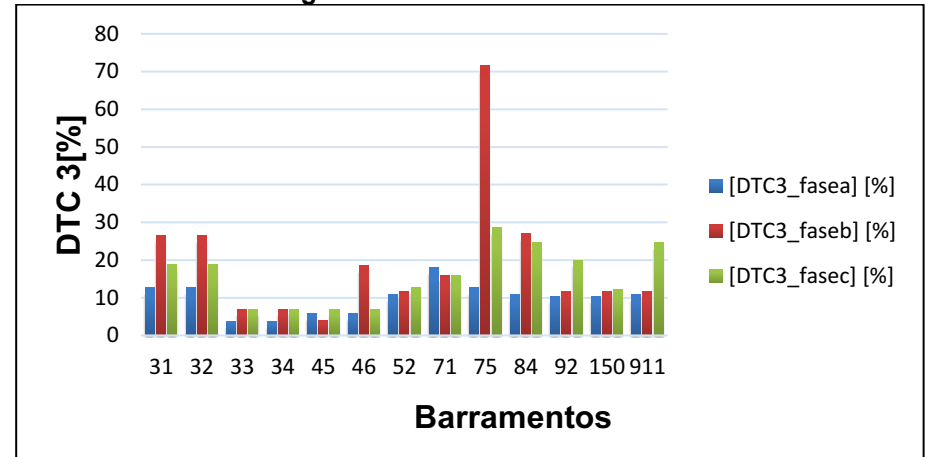
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 49 – Caso Base: DTC



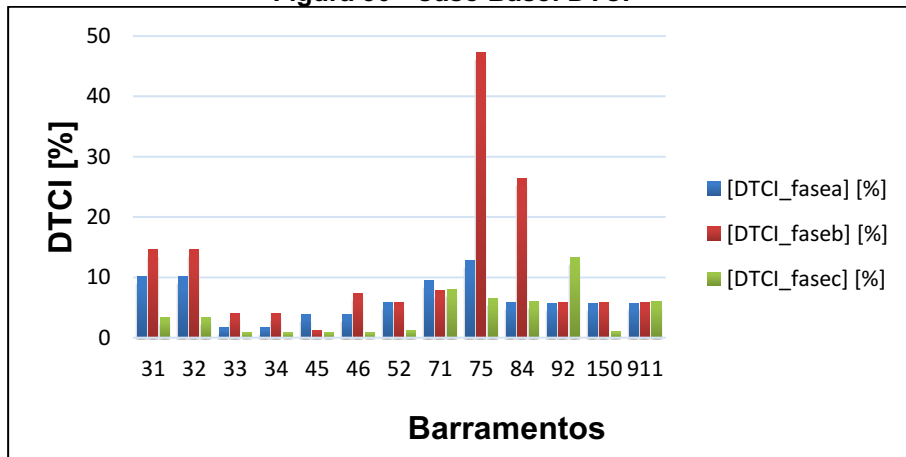
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 51 - Caso Base: DTC3



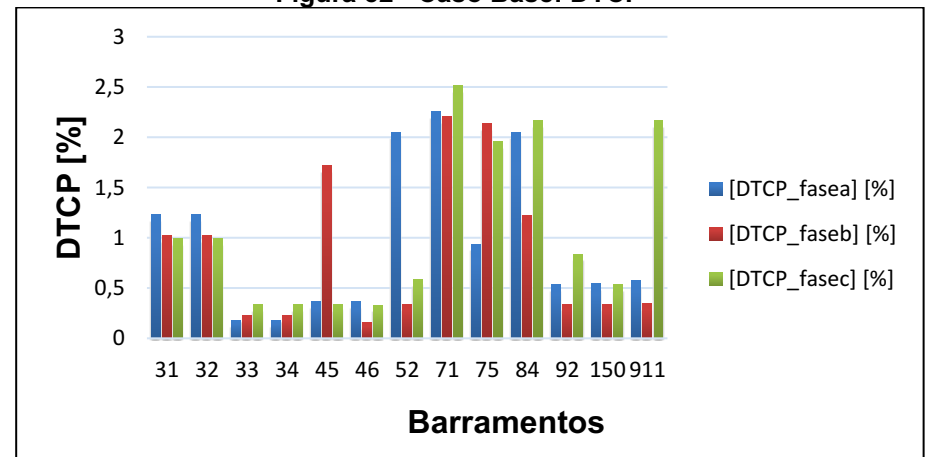
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 50 - Caso Base: DTCl



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 52 - Caso Base: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

II. CENÁRIO 1 – FILTROS INSTALADOS NA BARRA 32

Quadro 18 - Cenário 1: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra nº	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT ₁ [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	1,7233	1,9266	1,5153	0,9619	1,4917	1,3681	1,4101	1,2115	0,6289	0,237	0,1388	0,1697
32	4,557	5,2174	4,6073	3,9242	4,7153	4,4157	2,2833	2,2193	1,2674	0,3921	0,2497	0,3502
33	4,5574	5,2178	4,6078	3,9248	4,7157	4,4161	2,2829	2,2193	1,2675	0,3924	0,2496	0,3505
34	4,5571	5,2178	4,6078	3,9246	4,7157	4,4161	2,2828	2,2193	1,2675	0,3924	0,2496	0,3505
45		5,3391			4,8226			2,2762			0,2601	
46		5,4211			4,8963			2,3122			0,2607	
52	9,2376			8,5873			3,3483			0,6169		
71	8,9079	9,8027	9,4765	8,2332	9,0266	9,1457	3,3518	3,8053	2,4211	0,5744	0,3652	0,5461
75	9,1962	10,0879	9,7224	8,4458	9,2579	9,3729	3,5894	3,9895	2,5211	0,5958	0,3744	0,5649
84	9,2376	9,8027	10,032	8,5873	9,0266	9,6631	3,3483	3,8053	2,6295	0,6169	0,3652	0,5928
92			9,4765			9,1457			2,4211			0,5461
150	8,9103	9,8042	9,4739	8,2367	9,0281	9,1433	3,3494	3,8055	2,4206	0,5768	0,3655	0,5444
911			10,2277			9,8376			2,7295			0,6136

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 19 - Cenário 1: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Barra n°	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC ₁ [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	10,5506	19,5984	12,1254	8,8893	18,0348	11,6973	5,5293	7,5904	3,0083	1,3126	1,1095	1,0718
32	10,5503	19,598	12,1252	8,8892	18,0345	11,6972	5,5288	7,59	3,0082	1,3127	1,1095	1,0718
33	2,653	5,2178	4,6078	2,5191	4,7157	4,4161	0,8091	2,2193	1,2675	0,1944	0,2496	0,3505
34	2,6529	5,2178	4,6078	2,519	4,7157	4,4161	0,809	2,2193	1,2675	0,1942	0,2496	0,3505
45		3,6555		3,9249	3,1618	4,4343	2,2739	0,621	1,2833	0,3869	1,7263	0,344
46		21,3461		3,9264	19,7856	4,4542	2,289	8,0096	1,2961	0,3896	0,1759	0,3428
52	13,9934			11,9618	9,0268	9,6632	6,9713	3,8053	2,6295	2,0328	0,3652	0,5929
71	21,6806	19,1395	19,3215	19,136	17,3504	17,4253	9,9425	7,7823	7,9564	2,2382	2,1727	2,5248
75	14,8458	72,0073	26,2527	11,3886	62,774	24,5287	9,4676	35,206	9,1545	1,0298	2,24	1,9347
84	13,9934	28,577	22,9145	11,9617	23,3076	21,2897	6,9713	16,4221	8,1993	2,0328	1,9275	2,1434
92			24,937	8,2332	9,0266	21,054	3,3518	3,8053	13,3385	0,5744	0,3652	0,8182
150	8,9103	9,8042	9,4739	8,2367	9,0281	9,1433	3,3494	3,8055	2,4206	0,5768	0,3655	0,5444
911			22,9145	8,5946	9,0714	21,2897	3,3519	3,8255	8,1993	0,6156	0,3706	2,1434

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 20 - Cenário 1: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra nº	[Ia_rms] [A]	[Ia_rms1] [A]	[Ib_rms] [A]	[Ib_rms1] [A]	[Ic_rms] [A]	[Ic_rms1] [A]	[Va_rms] [V]	[Va_rms1] [V]	[Vb_rms] [V]	[Vb_rms1] [V]	[Vc_rms] [V]	[Vc_rms1] [V]
31	318,2497	316,4931	227,0133	222,7752	316,8922	314,5879	2462,6268	2462,1487	2476,8294	2476,3408	2461,9343	2461,583
32	318,2514	316,4948	227,0137	222,7757	316,8944	314,5902	2431,7107	2429,01	2476,5498	2473,1542	2403,5677	2400,9639
33	0,2685	0,2684	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	2431,764	2428,9932	2476,5696	2473,1546	2403,582	2400,9611
34	2,3081	2,3072	0	0	0	0	280,557	280,2374	285,7571	285,3631	277,3355	277,0331
45	0	0	89,8943	89,8343	0	0	2431,7107	2429,01	2454,4285	2450,754	2409,2283	2406,3387
46	0	0	38,3597	37,5146	0	0	2431,7107	2429,01	2450,7567	2446,9017	2410,3844	2407,3233
52	64,2705	63,6503	0	0	0	0	2395,852	2383,86	2523,1717	2511,0361	2326,7271	2315,0707
71	62,6745	61,2514	65,3276	64,163	60,5785	59,4784	2405,9369	2396,1906	2523,1567	2511,0413	2337,942	2327,3495
75	202,8326	200,6333	83,4531	67,7224	120,7518	116,7937	2390,2936	2380,2497	2528,8408	2516,0708	2333,1302	2322,1806
84	64,2705	63,6504	0,046	0,0027	70,5102	68,7289	2395,8521	2383,8601	2523,1566	2511,0412	2326,7286	2315,0704
92	0	0	0	0	31,6058	30,6666	2405,9369	2396,1906	2523,1567	2511,0413	2337,942	2327,3495
150	0	0	0	0	0	0	2406,5147	2396,2633	2523,4553	2511,0076	2338,3936	2327,3427
911	0	0	0	0	70,5096	68,7283	2395,8521	2383,8601	2522,0434	2509,7862	2322,5723	2310,519

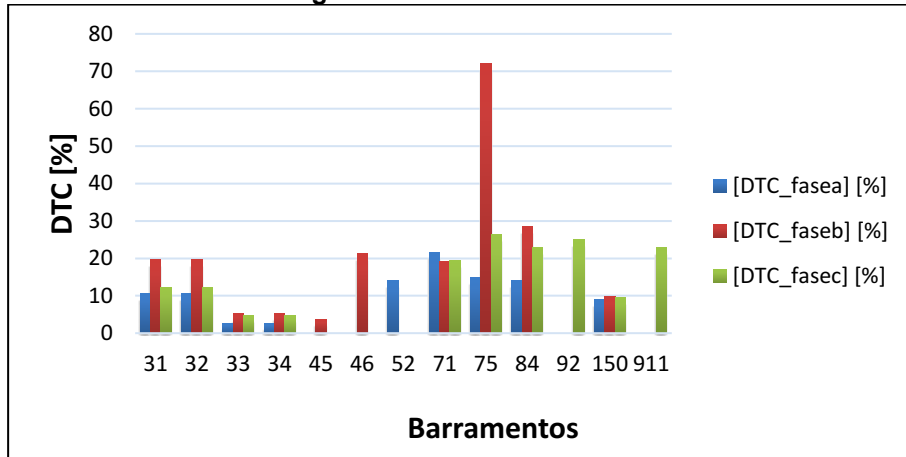
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 21 - Cenário 1: Fatores de Potências, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9901	0,9744	0,9648	2051,28	2051,5	559,32	469,77	2126,17	2105,3
32	0,9886	0,9798	0,9686	2032,01	2033,19	521,18	411,68	2097,78	2075,05
33	0,9992	0,9131	0,9124	0,61	0,61	0,27	0,27	0,66	0,66
34	0,9992	0,91	0,9093	0,59	0,59	0,27	0,27	0,65	0,65
45	0,9983	0,8063	0,805	177,61	177,53	130,91	130,21	220,64	220,16
46	0,9731	0,8676	0,8442	79,37	79,64	50,39	45,65	94,01	91,79
52	0,9776	0,8305	0,8119	125,03	126,02	89,88	84,51	153,98	151,73
71	0,9738	0,8675	0,8448	386,29	387,2	244,66	221,97	457,25	446,31
75	0,9371	0,8956	0,8393	820,47	823,22	531,53	-151,94	977,6	919,17
84	0,9726	0,9142	0,8891	282,87	284,17	145,64	67,09	318,16	310,85
92	0,9433	0,7476	0,7052	52,11	53,36	52,39	47,4	73,89	71,37
150	0,9995	1	0,9995	0	0	0	0	0	0
911	0,9676	0,9937	0,9616	157,47	157,8	44,97	-17,78	163,76	158,8

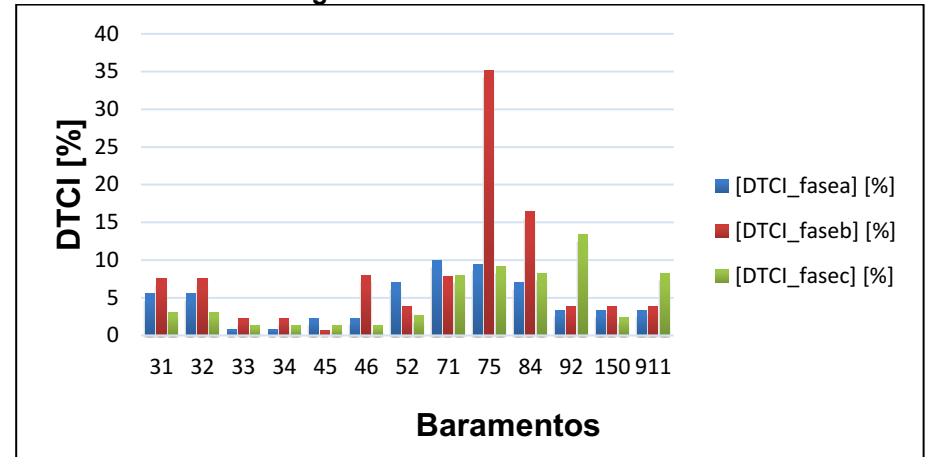
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 53- Cenário 1: DTC



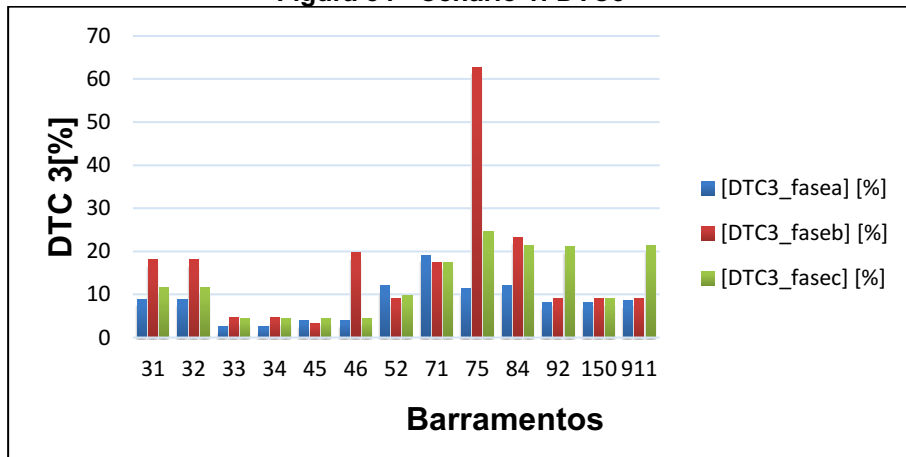
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 55 - Cenário 1: DTCl



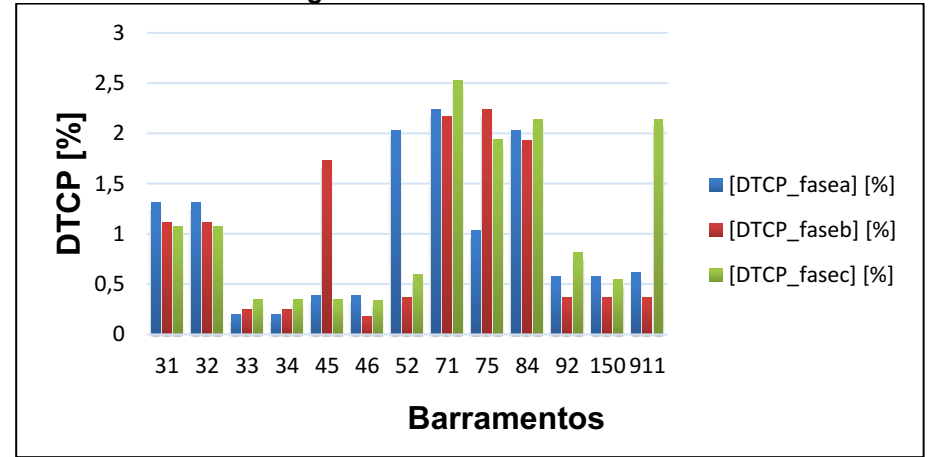
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 54 - Cenário 1: DTC3



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 56 - Cenário 1: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

III. CENÁRIO 2 – FILTROS INSTALADOS NA BARRA 71

Quadro 22 - Cenário 2: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra nº	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT ₁ [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	1,6486	1,7014	1,4937	0,7511	1,2266	1,4286	1,4464	1,173	0,4056	0,2483	0,1191	0,1604
32	3,8648	4,1549	3,958	2,927	3,6925	3,8736	2,4844	1,8955	0,7476	0,444	0,1889	0,3192
33	3,865	4,1555	3,9582	2,9277	3,693	3,8738	2,4839	1,8958	0,7478	0,4443	0,1889	0,3196
34	3,8648	4,1555	3,9582	2,9275	3,693	3,8738	2,4837	1,8958	0,7478	0,4443	0,1889	0,3196
45		4,2848			3,8173			1,9365			0,1952	
46		4,3642			3,8932			1,9624			0,1957	
52	6,5447			5,4462			3,5574			0,7194		
71	6,2637	6,4021	6,6335	5,1218	5,8719	6,5205	3,5421	2,5316	1,1003	0,6741	0,313	0,525
75	6,5519	6,6437	6,8844	5,3008	6,0707	6,7621	3,7872	2,6798	1,1722	0,6965	0,3225	0,5432
84	6,5447	6,4021	7,2014	5,4462	5,8719	7,0689	3,5574	2,5316	1,2484	0,7194	0,313	0,5765
92			6,6335			6,5205			1,1003			0,525
150	6,2659	6,4038	6,6326	5,1262	5,8735	6,5198	3,539	2,5323	1,0999	0,677	0,3136	0,5233
911			7,4022			7,2583			1,3242			0,5973

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Quadro 23 - Cenário 2: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra nº	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC _i [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	8,3969	15,8299	9,9983	6,231	14,364	9,7893	5,4583	6,5979	1,7921	1,3746	0,8523	0,9618
32	8,3966	15,8295	9,9981	6,2309	14,3638	9,7891	5,4579	6,5976	1,7921	1,3746	0,8524	0,9617
33	2,0473	4,1555	3,9582	1,8432	3,693	3,8738	0,8631	1,8958	0,7478	0,2218	0,1889	0,3196
34	2,0472	4,1555	3,9582	1,8431	3,693	3,8738	0,8629	1,8958	0,7478	0,2217	0,1889	0,3196
45		3,1805		2,9253	2,6158	3,8857	2,4928	0,4807	0,7575	0,4551	1,7442	0,3104
46		21,9026		2,9221	20,2853	3,9033	2,4842	8,2583	0,7646	0,4454	0,1816	0,3085
52	15,4584			13,6376	5,8721	7,0689	7,0023	2,5317	1,2484	1,9864	0,3131	0,5766
71	21,3429	18,2786	34,5835	16,821	15,4256	27,3146	12,7824	9,4242	21,0646	3,0308	2,7096	2,4922
75	13,5815	56,6372	23,5596	9,2332	49,8742	22,4315	9,8963	26,7571	6,9454	1,1258	2,0978	1,9082
84	15,4584	23,8054	20,7631	13,6376	17,6728	19,6363	7,0023	12,9296	6,4107	1,9864	9,3378	2,1043
92			26,044	5,1218	5,8719	22,492	3,5421	2,5316	13,1041	0,6741	0,313	0,8272
150	6,2659	6,4038	6,6326	5,1262	5,8735	6,5198	3,539	2,5323	1,0999	0,677	0,3136	0,5233
911			20,7631	5,4505	5,9011	19,6362	3,5557	2,5377	6,4107	0,7192	0,3182	2,1044

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 24 - Cenário 2: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra nº	[I _{a_rms}] [A]	[I _{a_rms1}] [A]	[I _{b_rms}] [A]	[I _{b_rms1}] [A]	[I _{c_rms}] [A]	[I _{c_rms1}] [A]	[V _{a_rms}] [V]	[V _{a_rms1}] [V]	[V _{b_rms}] [V]	[V _{b_rms1}] [V]	[V _{c_rms}] [V]	[V _{c_rms1}] [V]
31	318,8321	317,7139	226,2315	223,4491	317,1959	315,6222	2462,2612	2461,8198	2476,1135	2475,7244	2461,6817	2461,339
32	318,8336	317,7155	226,232	223,4498	317,1982	315,6246	2430,7404	2428,7744	2473,8949	2471,737	2402,5128	2400,5834
33	0,2684	0,2684	0,0025	0,0025	0,0024	0,0024	2430,7912	2428,7573	2473,9139	2471,7373	2402,526	2400,5804
34	2,3073	2,3069	0	0	0	0	280,4448	280,2102	285,4507	285,1996	277,2137	276,9892
45	0	0	89,8348	89,7894	0	0	2430,7404	2428,7745	2451,7755	2449,3498	2408,1564	2405,9568
46	0	0	38,3834	37,4946	0	0	2430,7404	2428,7744	2448,0845	2445,4997	2409,3015	2406,9404
52	64,5081	63,7509	0	0	0	0	2394,8089	2387,8677	2519,2415	2513,9988	2325,4858	2319,4434
71	55,579	54,3546	58,5221	57,5682	55,7129	52,653	2405,1849	2400,2222	2519,2258	2514,0022	2337,0308	2331,7388
75	202,7346	200,8898	77,9175	67,7981	120,2183	117,0143	2389,3635	2384,2514	2524,5602	2519,007	2332,062	2326,5551
84	64,5081	63,7509	0,0453	0,0027	70,331	68,8623	2394,8089	2387,8677	2519,2259	2514,0022	2325,4875	2319,4433
92	0	0	0	0	31,7486	30,7238	2405,1849	2400,2222	2519,2258	2514,0022	2337,0308	2331,7388
150	0	0	0	0	0	0	2405,7949	2400,3044	2519,5445	2513,9721	2337,4947	2331,7343
911	0	0	0	0	70,3304	68,8617	2394,809	2387,8678	2518,0438	2512,7489	2321,2202	2314,8868

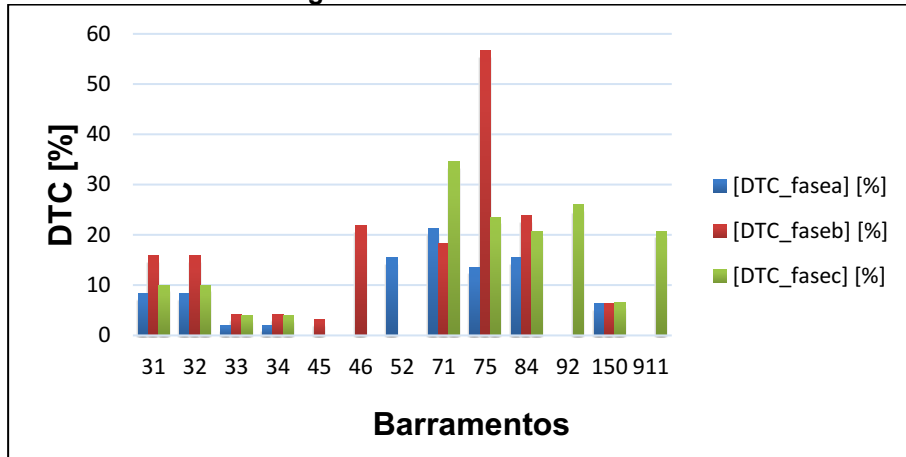
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 25 - Cenário 2: Fatores de Potência, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9934	0,9737	0,9673	2056,57	2056,71	539,11	478,36	2126,06	2112,21
32	0,9925	0,9792	0,9718	2037,65	2038,36	494,32	419,89	2096,75	2081,65
33	0,9994	0,9131	0,9125	0,61	0,61	0,27	0,27	0,66	0,66
34	0,9994	0,91	0,9094	0,59	0,59	0,27	0,27	0,65	0,65
45	0,9986	0,8063	0,8052	177,34	177,33	130,62	130,08	220,25	219,93
46	0,9726	0,8676	0,8438	79,29	79,55	50,43	45,6	93,97	91,69
52	0,9787	0,8305	0,8127	125,56	126,42	90,01	84,8	154,48	152,23
71	0,9759	0,9799	0,9563	393,35	389,98	120,21	78,79	411,31	397,96
75	0,9556	0,8959	0,8562	823,21	826,06	496,75	-152,31	961,47	922
84	0,9764	0,9141	0,8926	283,97	285,17	143,46	67,18	318,15	311,96
92	0,951	0,7478	0,7111	52,76	53,57	52,17	47,57	74,2	71,64
150	0,9995	1	0,9995	0	0	0	0	0	0
911	0,9743	0,9936	0,9681	158,04	158,39	40,91	-17,97	163,25	159,41

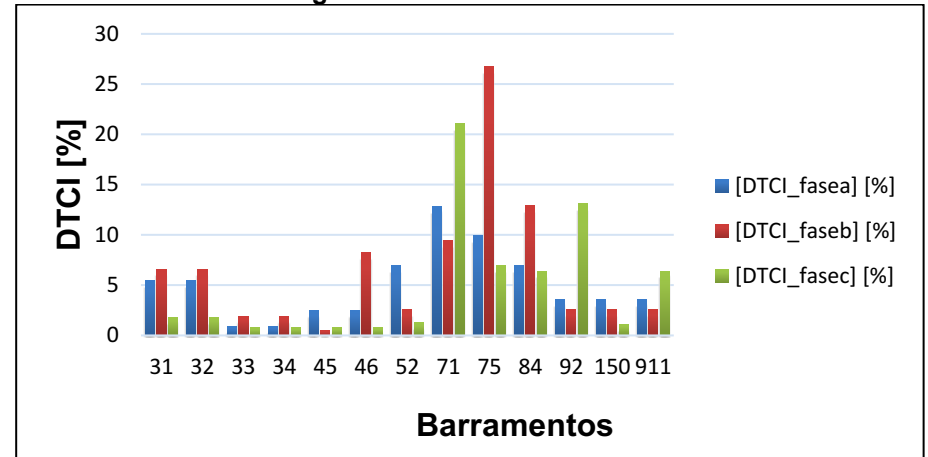
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 57 - Cenário 2: DTC



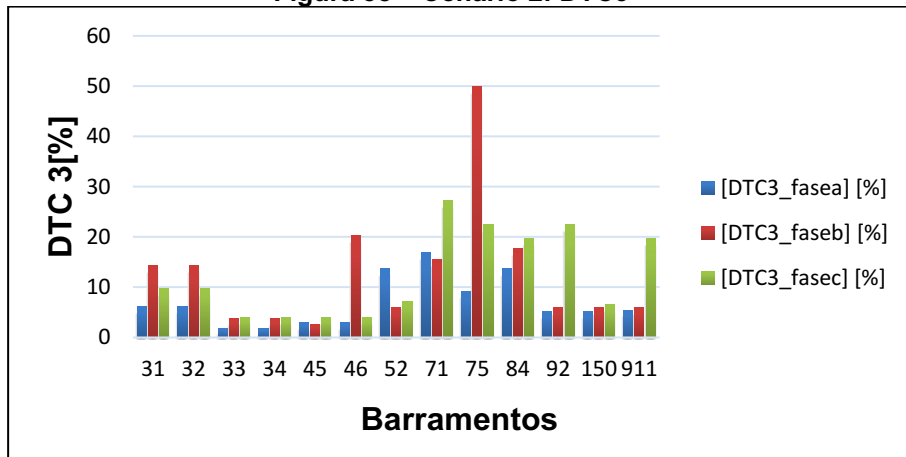
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 59 - Cenário 2: DTCl



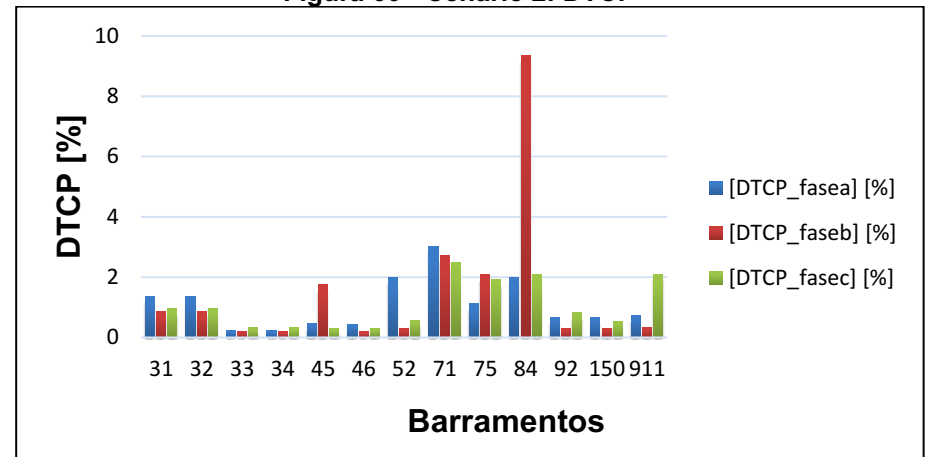
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 58 - Cenário 2: DTC3



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 60 - Cenário 2: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

IV. CENÁRIO 3 – FILTROS INSTALADOS NA BARRA 75

Quadro 26 - Cenário 3: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra n°	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT _i [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	0,852	1,0911	1,3414	0,6014	0,8137	1,0736	0,5735	0,7192	0,7971	0,1878	0,105	0,1069
32	2,5363	2,9434	3,5161	2,2626	2,5991	2,9577	1,1013	1,37	1,8915	0,3172	0,1782	0,192
33	2,537	2,9439	3,5164	2,2635	2,5997	2,9584	1,1011	1,3699	1,8911	0,3169	0,1781	0,1921
34	2,5369	2,9439	3,5164	2,2634	2,5997	2,9584	1,1011	1,3699	1,8911	0,3169	0,1781	0,1921
45		3,0955			2,7482			1,4097			0,2053	
46		3,1769			2,8259			1,4368			0,2064	
52	4,726			4,255			1,9929			0,5086		
71	4,2863	4,4961	5,8321	3,8679	4,0208	4,9387	1,7857	2,0015	3,0893	0,4722	0,2059	0,2808
75	4,2812	4,5021	5,8068	3,8416	3,9944	4,8924	1,8272	2,0664	3,1145	0,4813	0,2094	0,2885
84	4,726	4,4961	6,744	4,255	4,0208	4,6453	1,9929	2,0015	3,6769	0,5086	0,2059	0,3047
92			5,8321			4,9387			3,0893			0,2808
150	4,2902	4,4977	5,8302	3,8729	4,0228	4,935	1,7845	2,001	3,0917	0,4712	0,2061	0,2801
911			7,0784			4,8952			3,9049			0,3193

Fonte: Aatoria Própria (2020).

Quadro 27 - Cenário 3: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Barra nº	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC ₁ [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	5,3794	9,7885	6,4004	4,933	9,2589	5,678	1,8755	3,0703	2,8913	1,0422	0,8131	0,605
32	5,3793	9,7883	6,4002	4,9329	9,2587	5,6779	1,8753	3,07	2,8911	1,0422	0,8131	0,605
33	1,4167	2,9439	3,5164	1,367	2,5997	2,9584	0,3367	1,3699	1,8911	0,158	0,1781	0,1922
34	1,4166	2,9439	3,5164	1,3669	2,5997	2,9584	0,3366	1,3699	1,8911	0,158	0,1781	0,1921
45		2,7097		2,26	2,0863	2,9815	1,1078	0,2516	1,8888	0,3178	1,7107	0,1943
46		22,799		2,2633	21,1577	2,9956	1,0963	8,493	1,8905	0,317	0,1331	0,1939
52	16,3039			14,4817	4,0211	5,6454	7,2023	2,0014	3,6768	2,055	0,2059	0,3047
71	23,9512	22,0372	21,8114	21,6314	20,1851	20,0669	10,0391	8,5378	8,193	2,2275	2,3036	2,4358
75	4,4796	20,1827	11,5213	3,3848	13,5556	11,368	2,9017	14,8841	1,714	0,4361	1,4317	0,7562
84	16,3038	21,8348	25,2955	14,4817	12,8248	20,9409	7,2023	17,5757	14,0939	2,055	1,8374	1,6441
92			27,1558	3,8679	4,0208	23,6391	1,7857	2,0015	13,3293	0,4722	0,2059	0,9809
150	4,2902	4,4977	5,8302	3,8729	4,0228	4,935	1,7845	2,001	3,0917	0,4712	0,2061	0,2801
911			25,2954	4,2603	4,0637	20,9408	1,9912	2,0143	14,0937	0,5115	0,2084	1,6441

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 28 - Cenário 3: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra nº	[Ia_rms] [A]	[Ia_rms1] [A]	[Ib_rms] [A]	[Ib_rms1] [A]	[Ic_rms] [A]	[Ic_rms1] [A]	[Va_rms] [V]	[Va_rms1] [V]	[Vb_rms] [V]	[Vb_rms1] [V]	[Vc_rms] [V]	[Vc_rms1] [V]
31	322,9577	322,4914	234,2229	233,1088	322,6602	322,0012	2450,776	2450,5799	2461,9018	2461,7243	2450,7815	2450,4931
32	322,9601	322,4939	234,2246	233,1105	322,6631	322,0042	2412,3426	2411,4107	2446,2945	2445,2097	2384,3336	2382,8104
33	0,2665	0,2664	0,0024	0,0024	0,0024	0,0024	2412,396	2411,3951	2446,3134	2445,2102	2384,3475	2382,8076
34	2,2903	2,29	0	0	0	0	278,3226	278,2071	282,266	282,1387	275,1161	274,9385
45	0	0	88,865	88,8323	0	0	2412,3426	2411,4107	2424,4015	2423,0631	2389,9267	2388,128
46	0	0	38,0467	37,0948	0	0	2412,3426	2411,4107	2420,7319	2419,2548	2391,057	2389,1019
52	63,9325	63,0994	0	0	0	0	2368,5239	2364,0201	2477	2474,3993	2300,147	2294,8979
71	62,4401	60,7227	64,7528	63,2355	60,3438	58,9577	2378,682	2376,2351	2476,9846	2474,4041	2311,1648	2307,078
75	199,8301	199,6295	45,5157	44,6152	118,6255	117,8453	2362,2393	2360,0774	2480,7838	2478,2734	2304,9491	2301,0727
84	63,9326	63,0994	0,0459	0,0027	70,2917	68,1453	2368,5239	2364,0201	2476,9847	2474,4042	2300,1487	2294,8978
92	0	0	0	0	31,4987	30,3978	2378,682	2376,2351	2476,9846	2474,4041	2311,1648	2307,078
150	0	0	0	0	0	0	2379,2638	2376,3068	2477,2868	2474,3716	2311,626	2307,0713
911	0	0	0	0	70,2911	68,1448	2368,5239	2364,0201	2475,8138	2473,1583	2296,1209	2290,3901

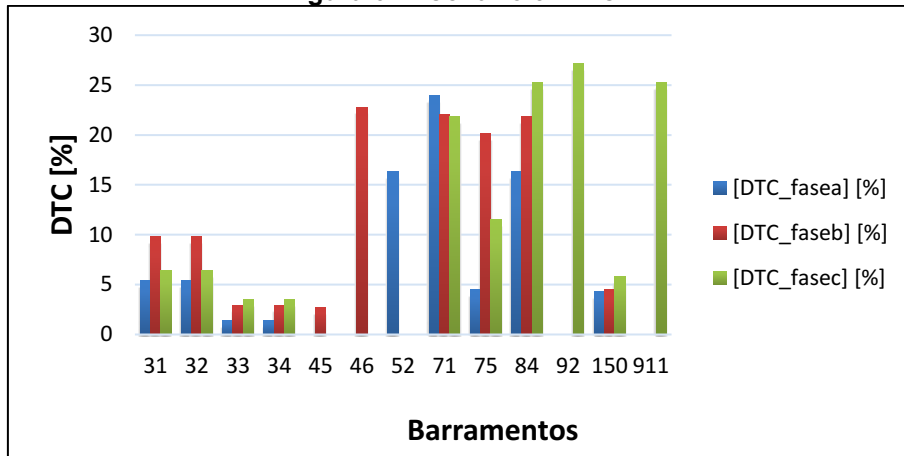
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 29 - Cenário 3: Fatores de Potências, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9973	0,9355	0,933	2014,27	2014,33	776,91	759,26	2158,9	2153,2
32	0,9968	0,9434	0,9404	1994,98	1995,29	721,42	698,7	2121,41	2114,94
33	0,9997	0,913	0,9128	0,6	0,6	0,27	0,26	0,65	0,65
34	0,9997	0,9099	0,9096	0,58	0,58	0,26	0,26	0,64	0,64
45	0,9991	0,8063	0,8056	173,55	173,55	127,66	127,32	215,44	215,25
46	0,9726	0,8676	0,8438	77,71	77,86	49,43	44,63	92,1	89,74
52	0,9808	0,8304	0,8145	123,33	123,87	87,86	83,12	151,43	149,17
71	0,9721	0,8676	0,8434	378,16	378,94	240,91	217,21	448,38	436,78
75	0,9954	0,951	0,9466	812,56	811,06	276,71	-2,34	858,39	852,88
84	0,9727	0,9141	0,8891	278,49	279,3	143,36	65,88	313,22	305,56
92	0,9546	0,748	0,7141	51,98	52,46	50,96	46,54	72,8	70,13
150	0,9995	1	0,9995	0	0	0	0	0	0
911	0,9652	0,9936	0,959	154,78	155,08	45,73	-17,59	161,4	156,08

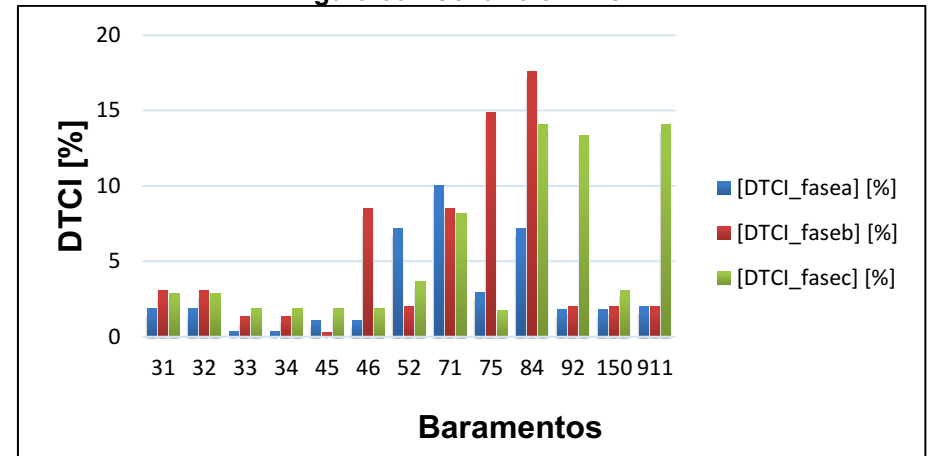
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 61 - Cenário 3: DTC



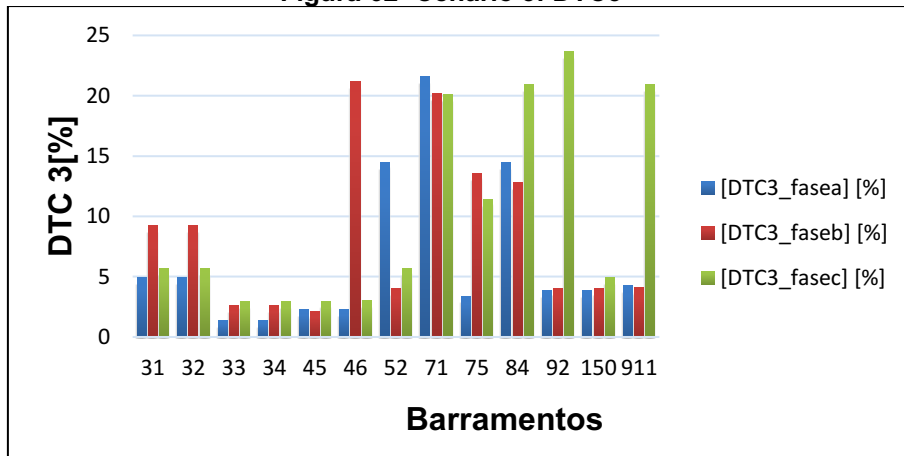
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 63 - Cenário 3: DTCl



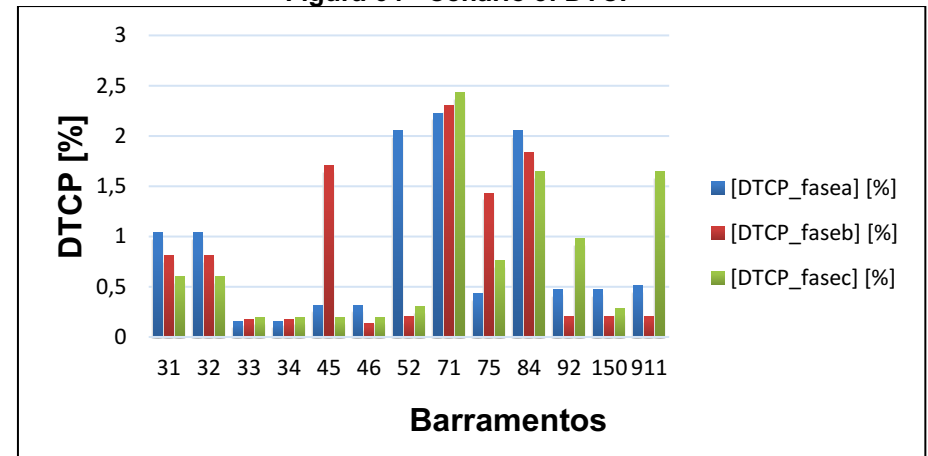
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 62 - Cenário 3: DTC3



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 64 - Cenário 3: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

V. CENÁRIO 4 – FILTROS INSTALADOS NAS BARRAS 75 E 911

Quadro 30 - Cenário 4: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra nº	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT ₁ [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	1,4067	0,4999	0,4641	1,1396	0,3321	0,3827	0,8123	0,3557	0,2515	0,1429	0,1145	0,0755
32	3,1152	1,4152	0,6669	2,6938	1,3307	0,5645	1,55	0,4302	0,322	0,2133	0,2168	0,15
33	3,1145	1,4145	0,6663	2,6924	1,33	0,564	1,5509	0,43	0,3214	0,2137	0,2169	0,15
34	3,1143	1,4145	0,6663	2,6923	1,33	0,564	1,5508	0,43	0,3214	0,2137	0,2169	0,15
45		1,5884			1,4825			0,5173			0,2399	
46		1,6797			1,5618			0,5693			0,241	
52	5,1834			4,4668			2,6059			0,3526		
71	4,8324	1,9655	1,1066	4,1679	1,9244	0,9871	2,4259	0,2768	0,4465	0,3089	0,2885	0,2255
75	4,9069	1,8723	1,0316	4,2216	1,8305	0,8996	2,482	0,2611	0,4499	0,31	0,2945	0,2292
84	5,1834	1,9655	1,2098	4,4668	1,9244	1,0726	2,6059	0,2768	0,5112	0,3526	0,2885	0,2277
92			1,1066			0,9871			0,4465			0,2255
150	4,8336	1,9649	1,1119	4,1701	1,9239	0,9909	2,4247	0,2766	0,4507	0,3087	0,2884	0,2268
911			1,2535			1,103			0,5469			0,2356

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 31 - Cenário 4: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Barra nº	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC _l [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	0,4782	0,4998	0,3012	0,3772	0,428	0,2252	0,2206	0,2309	0,184	0,1943	0,1154	0,0785
32	1,3556	1,4339	1,0278	1,2729	1,3525	0,9528	0,3193	0,433	0,3657	0,3396	0,1982	0,1218
33	1,3547	1,4331	1,0268	1,2716	1,3516	0,952	0,3201	0,433	0,3649	0,34	0,1987	0,1219
34	0,5293	0,53	0,4578	0,2885	0,1603	0,3451	0,3593	0,4156	0,2918	0,2604	0,2872	0,0732
45		1,6088			1,5044			0,5213			0,2305	
46		1,7006			1,5838			0,5742			0,2325	
52	2,4338			2,2768			0,6673			0,5421		
71	2,1503	1,9251	1,74	2,0286	1,8753	1,6344	0,5093	0,3875	0,5775	0,4992	0,1981	0,1511
75	2,0619	1,8414	1,662	1,9434	1,7929	1,5482	0,4645	0,3675	0,5846	0,5087	0,2033	0,1531
84	2,4338	1,9251	1,8263	2,2768	1,8753	1,7082	0,6673	0,3875	0,629	0,5421	0,1981	0,1474
92			1,74			1,6344			0,5775			0,1511
150	2,1524	1,9243	1,7476	2,0314	1,8745	1,6404	0,5079	0,3873	0,5832	0,4987	0,1982	0,1525
911			1,8435			1,7136			0,6623			0,1532

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 32 - Cenário 4: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra n°	[Ia_rms] [A]	[Ia_rms1] [A]	[Ib_rms] [A]	[Ib_rms1] [A]	[Ic_rms] [A]	[Ic_rms1] [A]	[Va_rms] [V]	[Va_rms1] [V]	[Vb_rms] [V]	[Vb_rms1] [V]	[Vc_rms] [V]	[Vc_rms1] [V]
31	320,5221	320,317	228,5008	228,1589	321,0929	321,0437	2456,5276	2456,3605	2468,0948	2467,7098	2453,3169	2452,7823
32	320,5241	320,319	228,5018	228,1601	321,0957	321,0465	2421,8029	2420,9114	2459,5743	2457,8539	2386,8095	2384,4292
33	0,4613	0,4613	0,0073	0,0073	0,4643	0,4643	2421,816	2420,8516	2459,6698	2457,8714	2386,8609	2384,4055
34	3,9613	3,9612	0	0	0	0	481,3624	481,2304	483,5986	483,5145	486,8911	486,6627
45	0	0	89,3226	89,2927	0	0	2421,8028	2420,9113	2437,7266	2435,6243	2392,6173	2389,7807
46	0	0	38,2852	37,2873	0	0	2421,8028	2420,9113	2434,0602	2431,8014	2393,8369	2390,7608
52	64,3889	63,4753	0	0	0	0	2379,3579	2377,577	2495,8761	2493,6559	2298,0364	2292,7743
71	62,9099	61,081	65,3851	63,7354	60,4963	58,9817	2391,2443	2390,0988	2495,8681	2493,6694	2311,548	2307,9644
75	201,5668	201,0327	62,5085	61,4034	117,3817	116,7264	2375,7327	2374,6242	2500,3475	2498,1249	2306,5332	2302,8475
84	64,3889	63,4754	0,0648	0,0026	68,3088	68,2644	2379,3578	2377,5769	2495,8681	2493,6694	2298,0215	2292,7738
92	0	0	0	0	31,5661	30,4103	2391,2443	2390,0988	2495,8681	2493,6694	2311,548	2307,9644
150	0	0	0	0	0	0	2391,4805	2390,1387	2496,1294	2493,6838	2312,2284	2307,9731
911	0	0	0	0	68,3084	68,264	2379,3578	2377,5769	2495,0911	2492,7582	2292,5789	2287,1193

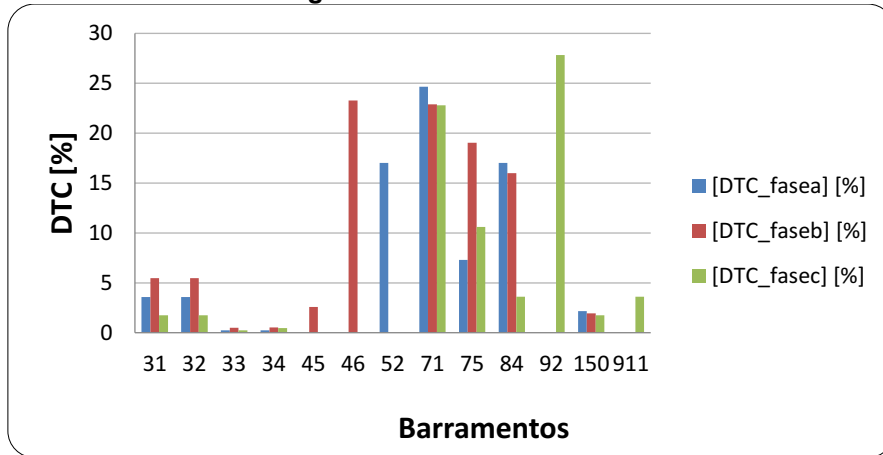
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 33 - Cenário 3: Fatores de Potências, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9992	0,9523	0,9515	2035,29	2035,3	658,22	649,44	2139,08	2137,29
32	0,9986	0,9593	0,958	2016,24	2016,32	603,63	589,24	2104,66	2101,76
33	0,9993	0,7974	0,7968	1,79	1,79	1,36	0,79	2,24	2,24
34	0,9997	0,9099	0,9097	1,73	1,73	0,79	0,79	1,91	1,91
45	0,9988	0,8063	0,8053	175,35	175,36	129,09	128,64	217,74	217,48
46	0,9719	0,8676	0,8431	78,57	78,67	50,11	45,1	93,19	90,68
52	0,9827	0,8305	0,8161	125,03	125,33	88,54	84,07	153,2	150,92
71	0,9716	0,8675	0,8429	382,23	382,63	244	219,37	453,47	441,05
75	0,9939	0,9129	0,9074	821,98	821,24	380,81	-152,96	905,91	899,57
84	0,9897	0,9139	0,9045	280,7	280,97	132,37	100,61	310,34	307,44
92	0,9584	0,7478	0,7167	52,3	52,49	50,88	46,6	72,97	70,19
150	0,9982	1	0,9982	0	0	0	0	0	0
911	0,9972	0,9946	0,9918	155,32	155,29	20,02	16,19	156,6	156,13

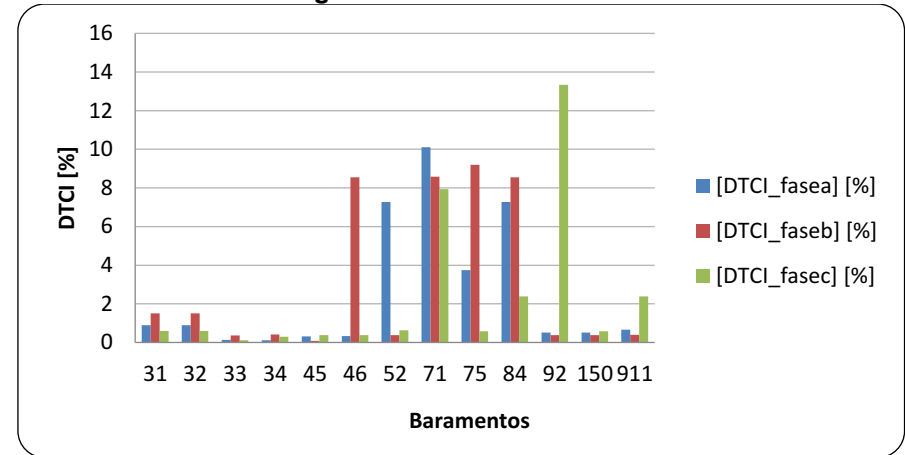
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 65 - Cenário 4: DTC



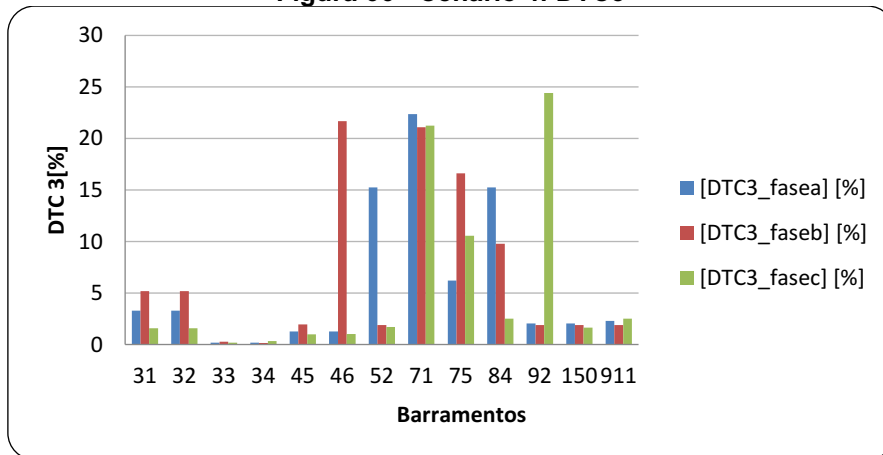
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 67 - Cenário 4: DTCl



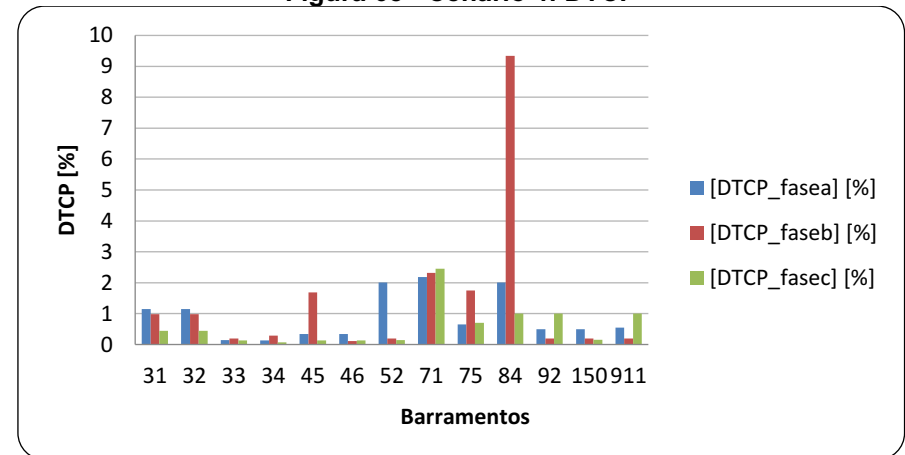
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 66 - Cenário 4: DTC3



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 68 - Cenário 4: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

VI. CENÁRIO 5 – FILTROS INSTALADOS NA BARRA 75 (USO DO BC EXISTENTE)

Quadro 34 - Cenário 5: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Tensão

Barra n°	DTT [%]			DTT ₃ [%]			DTT ₁ [%]			DTT _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	1,4159	0,5605	1,7547	1,1509	0,4204	1,726	0,8121	0,3553	0,3005	0,1439	0,1058	0,0982
32	3,1499	1,4381	3,8051	2,7343	1,3574	3,7692	1,5493	0,4299	0,4835	0,2121	0,2015	0,1959
33	3,1499	1,4385	3,8052	2,7344	1,3579	3,7692	1,5492	0,4301	0,4839	0,2121	0,2016	0,1963
34	3,1498	1,4385	3,8052	2,7343	1,3579	3,7692	1,5491	0,4301	0,4839	0,2121	0,2016	0,1963
45		1,6117			1,5101			0,517			0,223	
46		1,7024			1,589			0,5686			0,2234	
52	5,6281			4,9658			2,6258			0,3493		
71	4,9718	2,0907	6,0025	4,3211	2,0532	5,9541	2,4393	0,2852	0,7034	0,311	0,2722	0,2898
75	5,0434	1,9892	5,7169	4,3709	1,9513	5,6703	2,4966	0,2689	0,6677	0,3123	0,2776	0,2907
84	5,6281	2,0907	8,6313	4,9658	2,0532	8,5616	2,6258	0,2852	1,0453	0,3493	0,2722	0,3251
92			6,0025			5,9541			0,7034			0,2898
150	4,9716	2,086	6,0027	4,3208	2,0487	5,9542	2,4395	0,2839	0,704	0,311	0,271	0,2906
911			9,6368			9,5578			1,1821			0,3442

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 35 - Cenário 5: Indicadores de Distorções Harmônicas Totais de Corrente

Barra nº	DTC [%]			DTC ₃ [%]			DTC ₁ [%]			DTC _P [%]		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
31	9,5889	4,9673	5,5023	8,8229	4,3118	5,3506	3,6784	2,284	1,169	0,7562	0,9303	0,5291
32	9,5887	4,9672	5,502	8,8228	4,3118	5,3503	3,6783	2,284	1,169	0,7562	0,9302	0,5291
33	1,8409	1,4385	3,8051	1,7102	1,3579	3,7691	0,6728	0,4301	0,4839	0,1072	0,2016	0,1963
34	1,8407	1,4385	3,8052	1,71	1,3579	3,7692	0,6727	0,4301	0,4839	0,1072	0,2016	0,1963
45		2,602		2,7336	1,9628	3,7642	1,5573	0,0772	0,4906	0,2215	1,7064	0,1983
46		23,2977		2,7295	21,6739	3,7645	1,5481	8,5443	0,4943	0,21	0,1406	0,197
52	16,3259			14,6593	2,0531	8,5616	6,8473	0,2852	1,0453	2,18	0,2722	0,3251
71	24,4653	22,9095	22,2553	22,2354	21,1013	20,7737	9,9257	8,6344	7,6294	2,3695	2,2429	2,3543
75	4,3291	16,914	27,7908	4,0106	16,2524	27,6781	1,6234	4,5267	2,4094	0,1424	1,2063	0,6665
84	16,3258	13,7804	49,1749	14,6593	11,7137	48,5128	6,8473	4,7648	7,8618	2,18	5,4759	1,6965
92			27,1558	4,3211	2,0532	23,932	2,4393	0,2852	12,8013	0,311	0,2722	0,9092
150	4,9716	2,086	6,0027	4,3208	2,0487	5,9542	2,4395	0,2839	0,704	0,311	0,271	0,2906
911			49,174	4,9699	2,2111	48,5124	2,6223	0,2991	7,8618	0,3507	0,2762	1,6965

Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 36 - Cenário 4: Tensões e Correntes RMS e Fundamentais

Barra n°	[Ia_rms] [A]	[Ia_rms1] [A]	[Ib_rms] [A]	[Ib_rms1] [A]	[Ic_rms] [A]	[Ic_rms1] [A]	[Va_rms] [V]	[Va_rms1] [V]	[Vb_rms] [V]	[Vb_rms1] [V]	[Vc_rms] [V]	[Vc_rms1] [V]
31	335,909	334,375	224,572	224,295	320,886	320,402	2435,995	2435,602	2472,997	2472,756	2474,457	2473,582
32	335,912	334,378	224,572	224,295	320,888	320,403	2373,979	2372,294	2459,826	2458,820	2446,383	2442,637
33	0,262	0,262	0,003	0,003	0,002	0,002	2374,048	2372,266	2459,889	2458,822	2446,456	2442,634
34	2,253	2,253	0,000	0,000	0,000	0,000	273,898	273,693	283,832	283,709	282,283	281,842
45	0,000	0,000	89,367	89,337	0,000	0,000	2373,979	2372,294	2437,841	2436,524	2452,174	2447,984
46	0,000	0,000	38,306	37,306	0,000	0,000	2373,979	2372,294	2434,158	2432,690	2453,371	2448,963
52	62,199	61,386	0,000	0,000	0,000	0,000	2304,164	2299,229	2492,853	2491,627	2400,345	2391,299
71	60,805	59,063	65,331	63,681	62,942	61,438	2314,293	2311,015	2492,843	2491,626	2410,372	2404,118
75	207,557	207,363	78,727	77,624	144,200	138,934	2297,082	2293,728	2494,293	2493,112	2409,374	2403,358
84	62,199	61,386	0,028	0,003	79,126	71,003	2304,165	2299,229	2492,843	2491,626	2400,344	2391,299
92	0,000	0,000	0,000	0,000	32,824	31,677	2314,293	2311,015	2492,843	2491,626	2410,372	2404,118
150	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	2314,486	2311,010	2493,235	2491,715	2410,771	2404,121
911	0,000	0,000	0,000	0,000	79,125	71,003	2304,165	2299,229	2491,613	2490,309	2397,659	2386,603

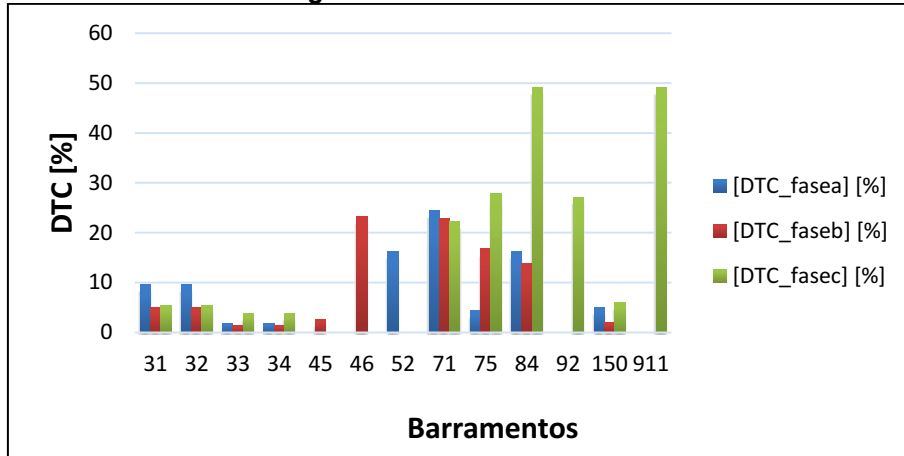
Fonte: Autoria Própria (2020).

Quadro 37 - Cenário 3: Fatores de Potências, Distorção e Potências

Barra nº	[FD]	[FP1_bus]	[FPbus_verd]	[P] [kW]	[P1_bus] [kW]	[Q] [kVAr]	[Q1_bus] [kVAr]	[S] [kVA]	[S1_bus] [kVA]
31	0,9972	0,945	0,9423	2042,68	2042,75	725,4	606,15	2167,66	2161,57
32	0,9964	0,9514	0,948	2023,78	2024,02	679,7	546,13	2134,87	2127,37
33	0,9994	0,9131	0,9126	0,58	0,58	0,26	0,26	0,63	0,63
34	0,9994	0,9099	0,9094	0,56	0,56	0,26	0,26	0,62	0,62
45	0,9991	0,8063	0,8055	175,49	175,5	129,1	128,76	217,86	217,67
46	0,9723	0,8675	0,8435	78,65	78,73	50,09	45,14	93,24	90,76
52	0,9811	0,8305	0,8148	116,77	117,21	83,09	78,62	143,32	141,14
71	0,9719	0,8676	0,8432	383,91	384,22	244,76	220,25	455,29	442,87
75	0,9833	0,8108	0,7973	813,74	813,33	615,96	-163,09	1020,57	1003,07
84	0,9306	0,9197	0,8559	285,29	285,98	172,36	59,97	333,31	310,94
92	0,9598	0,7479	0,7178	56,79	56,95	55,08	50,56	79,12	76,16
150	0,9989	1	0,9989	0	0	0	0	0	0
911	0,8915	0,9937	0,8858	168,05	168,38	88,04	-19,04	189,71	169,46

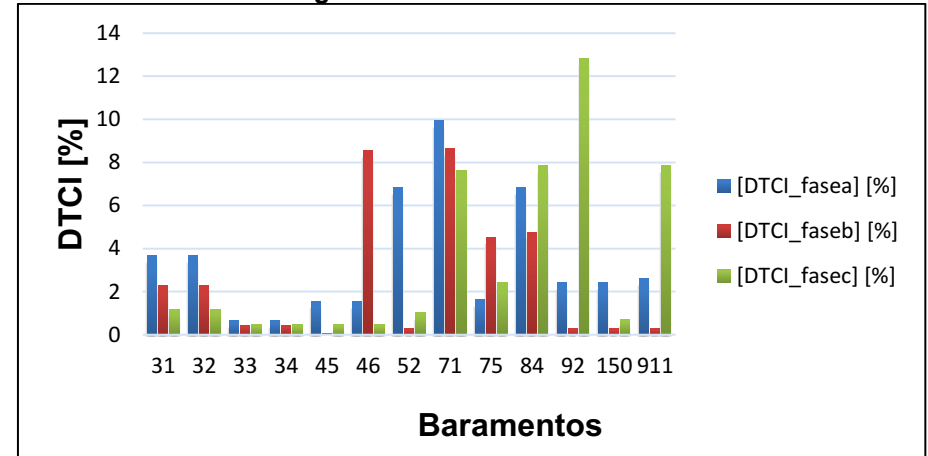
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 69 - Cenário 5: DTC



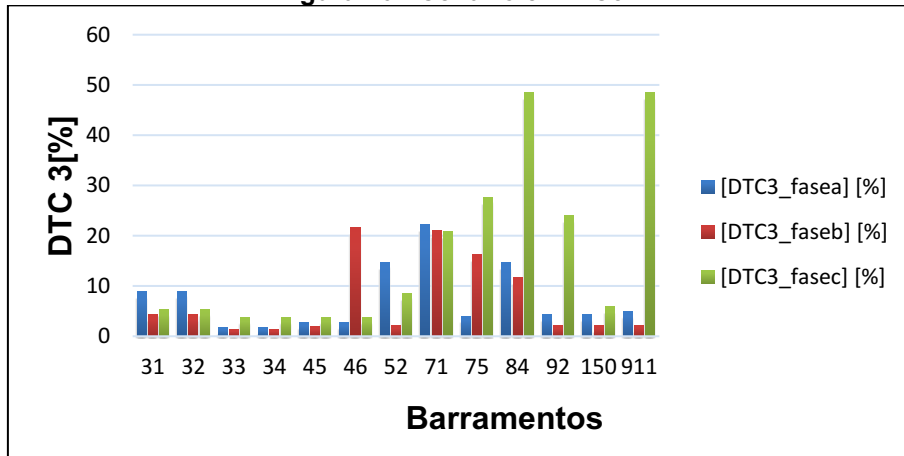
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 71 - Cenário 5: DTCl



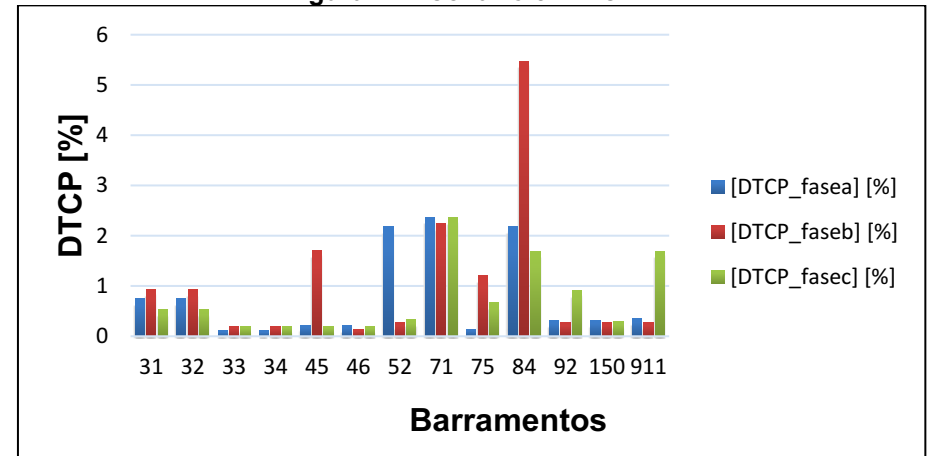
Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 70 - Cenário 5: DTC3



Fonte: Autoria Própria (2020).

Figura 72 - Cenário 5: DTCP



Fonte: Autoria Própria (2020).

ANEXO A – Dados e Informações do SEP Teste

O alimentador de teste de distribuição radial de 13 barramentos IEEE é um sistema desequilibrado e serve como um sistema de referência para estudos de propagação harmônica desequilibrada. O alimentador contém reguladores de tensão, configurações de linha trifásica e monofásica, capacitores de derivação e cargas pontuais e distribuídas. Para estudos de harmônicos, as composições de carga são especificadas para incluir cargas de produção harmônica. Os espectros de corrente para os três tipos de carga, como bancos de luz fluorescente, inversores de velocidade ajustáveis e cargas residenciais compostas (“Outras”), são fornecidos para fins de teste. A análise da propagação harmônica em sistemas de distribuição deve necessariamente utilizar uma representação no domínio de fase. Os seguintes itens devem ser considerados na análise de sistemas de distribuição desequilibrados:

- É difícil identificar ou especificar cargas que produzem harmônicas, pois várias cargas são atendidas a partir de um ponto e as correntes harmônicas representam a resposta agregada de vários dispositivos produtores de harmônicas;
- Muitos sistemas de distribuição tendem a conter capacitores. A análise de varredura de frequência pode ser útil para verificar se existem condições de ressonância. Devido a muitos possíveis locais de fontes harmônicas, no entanto, é difícil determinar os barramentos de varredura de frequência;
- As propriedades comumente assumidas sob condições equilibradas, como a natureza de sequência zero dos harmônicos triplos, não se mantêm. Os dispositivos de produção de harmônicos no nível de distribuição podem gerar harmônicos não característicos.
- As conexões de carga e transformador podem ter grandes impactos na propagação harmônica. O assunto da modelagem de carga para análise harmônica do sistema de distribuição ainda precisa de pesquisas consideráveis.

O Programa de Transientes Alternativos foi utilizado para calcular a propagação harmônica no sistema. Resultados parciais são mostrados por unidade (p.u) na Tabela 11.5.

Tabela 11.5 - Tensão THD (Componente de Frequência Fundamental)

Nó #	Fase A	Fase B	Fase C
32	1.96(1.034)	1.76 (1.038)	1.69(1.007)
33	1.96(1.034)	1.76(1.038)	1.69(1.007)
34	0.96(1.018)	0.96(1.030)	1.04(1.022)
71	3.23(1.010)	2.76(1.045)	2.86(0.969)
75	3.35(1.003)	2.82(1.048)	2.95(0.967)
52	3.30(1.008)		
911			3.00(0.965)

Os recursos de modelagem e simulação são:

- As cargas convencionais foram modeladas como impedâncias constantes de RL, obtidas a partir do dado kVA a 60Hz.
- As cargas produtoras de harmônicos foram modeladas como fontes de corrente com os espectros especificados usando a capacidade de 'Modelos' do ATP. As magnitudes foram dimensionadas com base na componente fundamental da corrente de carga e os ângulos de fase foram ajustados com base no ângulo de fase da tensão através da carga obtida da solução de frequência fundamental.
- O motor e o capacitor no nó 34 foram considerados fora de serviço. Para frequências harmônicas, o motor deve ser modelado usando sua impedância sub transitória (ou impedância do rotor bloqueado).
- O regulador de tensão não foi modelado. Foi realizada uma compensação manual de tensão em cada fase proporcional à que o regulador proporcionaria.
- As linhas foram modeladas como ramificações pi mutuamente acopladas.
- Para o caso estudado, os níveis de distorção de tensão são baixos. Os resultados significativamente diferentes são obtidos dependendo da

escolha dos modelos de carga e dos modelos de fonte de corrente harmônica. Todas as cargas foram assumidas como terra-fase conectadas e o motor e o capacitor na barra 34 foram considerados fora de serviço.

DADOS DO TESTE

Sistema de origem: Nó 50

Curto-circuito: MVA 1100 a 82 graus de atraso. Equilibrado

Subestação: Nó 50 -31

Transformador: 5 MVA, 115 kV delta, -4,16 kV em estrela aterrado

Impedância $z = 1 + j 8\%$ a 60 Hz.

Reguladores de tensão: conectados no nó 31

controle de fase individual. Conexão em estrela, relação PT = 20, CT

Classificação = 700 A, $R + jX = 3 + j9$ W, nível de tensão = 122 V

Transformadores: Nó 33 - Nó 34

500 KVA, 4160 delta - 480, volts em estrela, $z = 1,1 + j 2,0\%$

FASE DE LINHA E MATRIZES DE IMPEDÂNCIA DE 60 HZ

De todos os condutores ACSR é mostrado o triângulo superior das matrizes de impedância do domínio de fase (Z_{ABC} [ohms/milha]) e de admissão (Y_{ABC} [mS/milhas]). Para fases inexistentes, as matrizes foram preenchidas com zeros.

- ID 501: Sequência de condutores BACN, condutor fase 556,500 26/7, condutor neutro 4/0 6/1.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.3477 + j1.0141 & 0.1565 + j0.4777 & 0.1586 + j0.4361 \\ 0.1565 + j0.4777 & 0.3375 + j1.0478 & 0.1535 + j0.3849 \\ 0.1586 + j0.4361 & 0.1535 + j0.3849 & 0.3414 + j1.0348 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} j6.2450 & -j1.7664 & -j1.3951 \\ -j1.7664 & j5.8271 & -j0.7461 \\ -j1.3951 & -j0.7461 & j5.6985 \end{bmatrix}$$

- ID 502: Sequência de condutores CABN, condutor fase 4/0 6/1, condutor neutro 4/0 6/1.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.7538 + j1.1775 & 0.1586 + j0.4361 & 0.1565 + j0.4777 \\ 0.1586 + j0.4361 & 0.7475 + j1.1983 & 0.1535 + j0.3849 \\ 0.1565 + j0.4777 & 0.1535 + j0.3849 & 0.7436 + j1.2112 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} j5.6587 & -j1.1943 & -j1.5024 \\ -j1.1943 & j5.2262 & -j0.6626 \\ -j1.5024 & -j0.6626 & j5.3220 \end{bmatrix}$$

- ID 503: Sequência de condutores CBN, condutor fase 1/0, condutor neutro 1/0.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.0000 + j0.0000 & 1.3294 + j1.3471 & 0.2066 + j0.4591 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.2066 + j0.4591 & 1.3238 + j1.3569 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & j4.7097 & -j0.8999 \\ 0.0000 & -j0.8999 & j4.6658 \end{bmatrix}$$

- ID 504: Sequência de condutores ACN, condutor fase 1/0, condutor neutro 1/0.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 1.3238 + j1.3569 & 0.0000 + j0.0000 & 0.2066 + j0.4591 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.2066 + j0.4591 & 0.0000 + j0.0000 & 1.3294 + j1.3471 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} j4.6658 & 0.0000 & -j0.8999 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ -j0.8999 & 0.0000 & j4.7097 \end{bmatrix}$$

- ID 505: Sequência dos condutores CN, condutor fase 1/0, condutor neutro 1/0.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 1.3395 + j1.3295 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & j4.6178 \end{bmatrix}$$

- ID 508: Cabos trifásicos URD neutros concêntricos de 250 MCM AL, 6" separados no plano horizontal 40" abaixo do solo. Neutro é 13 # 14Cu. OD sobre neutro é 1,28".

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.8506 + j0.4037 & 0.3191 + j0.0325 & 0.3191 + j0.0325 \\ 0.3191 + j0.0325 & 0.8597 + j0.4458 & 0.2848 + j0.0145 \\ 0.3191 + j0.0325 & 0.2848 + j0.0145 & 0.8597 + j0.4458 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} j94.6212 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & j94.6212 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & j94.6212 \end{bmatrix}$$

- ID 509: Blindagem de fita URD monofásica; Condutor blindado de fita de cobre de 1/0 com neutro nu de cobre de 1/0 separado em espaçamento de 1 "; 40" de profundidade.

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} 0.9806 + j0.5146 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \\ 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 & 0.0000 + j0.0000 \end{bmatrix}$$

$$Y_{ABC} = \begin{bmatrix} j0.3915 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \end{bmatrix}$$

Dados De Conectividade De Linha

Nó [I]	Nó [J]	Comprimento[(ft)	ID
32	45	500	503
33	32	500	502
45	46	300	503
31	32	2000	501
52	84	800	509
71	32	2000	501
71	84	800	504
71	150	1000	501
75	92	500	508
84	911	300	505
71	92	Chave	

Capacitores em Derivação [kVAr]

Nó	Conexão	Fase A	Fase B	Fase C
75	Y	200	200	200
34	Y	125	125	125
911		0	0	100

CARGAS

Os seguintes códigos de modelo são usados: conexão D-delta ou fase-fase, conexão Y-Y ou fase-terra. Modelo de frequência fundamental kVA constante S, modelo de frequência fundamental impedância constante Z, modelo de frequência fundamental corrente constante.

Nó	Modelo	Fase A [kW]	Fase A [kVAr]	Fase B [kW]	Fase B [kVAr]	Fase C [kW]	Fase C [kVAr]
34	Y-PQ	42.63	20.18	0	0	0	0
45	Y-PQ	0	0	170.53	125.09	0	0
46	D-Z	0	0	230.22	131.97	0	0
52	Y-Z	127.90	85.79	0	0	0	0
71	D-PQ	383.70	219.95	383.70	219.95	383.70	213.95
75	Y-PQ	486.02	189.07	68.21	60.55	289.91	212.65
92	D-I	0	0	0	0	170.53	151.38
911	Y-I	0	0	0	0	170.53	80.74
32	Y-PQ	16.48	9.45	66.40	38.06	116.97	97.05
71	Nota: esta é uma carga distribuída entre os nós 32 e 71						

Nó	Tipo de Carga Harmônica
34	Nenhuma
45	60% Outras.
46	20% Fluorescente, 20% ASD, 20% Outras. Essa carga está conectada entre as fases B e C.
52	10% Fluorescente, 10% ASD, 20% Outras.
71	30% Fluorescente, 60% Outras.
75	15% Fluorescente, 20% ASD, 15% Outras.
92	15% Fluorescente, 20% ASD, 15% Outras. Essa carga está conectada entre as fases A e C.
911	15% Fluorescente, 20% ASD, 15% Outras.
32	-

Espectros atuais de cargas harmônicas: os ângulos de fase são em relação à tensão de frequência fundamental em graus.

h	Fluorescente		ASD		Outros	
	Mag.[pu]	Ang. [°]	Mag.[pu]	Ang. [°]	Mag.[pu]	Ang. [°]
1	1	-41.2	1	-1.5	1	-35.0
2	0	0	0	0	0	0
3	0.2	273.4	0.542	0.7	0.007	-105.8
4	0	0	0	0	0.095	-167.4
5	0.107	339.0	0.152	110.8	0.002	-275.5
6	0	0	0	0	0.083	-42.6
7	0.021	137.7	0.069	151.9	0	0
8	0	0	0	0	0.005	-247.8
9	0.014	263.2	0.043	-95.0	0	0
10	0	0	0	0	0	0
11	0.009	39.8	0.036	-13.9	0	0
12	0	0	0	0	0	0
13	0.006	182.4	0.029	95.2	0	0
14	0	0	0	0	0	0
15	0.005	287.0	0.025	-182.7	0	0