



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE  
COMPUTAÇÃO



**CARLOS HENRIQUE SOARES TAVARES  
PEDRO HENRIQUE ALVES RIBEIRO**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS E  
ELETROMAGNÉTICOS DE SEQUÊNCIA ZERO**

**GOIÂNIA - GO  
2019**



**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR  
VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC nº 1204/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei nº 9610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou *download*, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

**1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):**

Nome completo do autor: Carlos Henrique Soares Tavares e Pedro Henrique Alves Ribeiro

Título do trabalho: Análise do desempenho de filtros harmônicos sintonizados e eletromagnéticos de sequência zero

**2. Informações de acesso ao documento:**

Concorda com a liberação total do documento [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

Havendo concordância com a disponibilização eletrônica, torna-se imprescindível o envio do(s) arquivo(s) em formato digital PDF do TCCG.

Carlos Henrique Soares Tavares Pedro Henrique Alves Ribeiro  
(Carlos Henrique Soares Tavares)<sup>2</sup> (Pedro Henrique Alves Ribeiro)<sup>2</sup>

Ciente e de acordo:

Fernando Nunes Belchior

(Fernando Nunes Belchior)<sup>2</sup>

Data: 17 / 07 / 19

<sup>1</sup> Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. A extensão deste prazo suscita justificativa junto à coordenação do curso. Os dados do documento não serão disponibilizados durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA ELÉTRICA, MECÂNICA E DE  
COMPUTAÇÃO



**CARLOS HENRIQUE SOARES TAVARES**  
**PEDRO HENRIQUE ALVES RIBEIRO**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE FILTROS HARMÔNICOS SINTONIZADOS E  
ELETROMAGNÉTICOS DE SEQUÊNCIA ZERO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à  
Universidade Federal de Goiás como um dos pré-  
requisitos para a obtenção do grau de Bacharel em  
Engenharia Elétrica, sob a orientação do Prof. Dr.  
Fernando Nunes Belchior.

**GOIÂNIA – GO**  
**2019**



Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Alves Ribeiro, Pedro Henrique

Análise do desempenho de filtros harmônicos sintonizados e eletromagnéticos de sequência zero [manuscrito] / Pedro Henrique Alves Ribeiro, Carlos Henrique Soares Tavares. - 2019.  
viii, 80 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Fernando Nunes Belchior.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC), Engenharia Elétrica, Goiânia, 2019.

Bibliografia.

Inclui gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Qualidade de Energia. 2. Filtros Harmônicos. 3. Filtro Eletromagnético de Sequência Zero. 4. Filtro Passivo Sintonizado. I. Soares Tavares, Carlos Henrique. II. Nunes Belchior, Fernando, orient. III. Título.

CDU 621.3



### ATA DE AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

#### CURSO

( x ) Eng. Elétrica    ( ) Eng. Mecânica    ( ) Eng. de Computação  
( ) Projeto Final 1    ( ) Projeto Final II

#### AVALIAÇÃO DE PROJETO FINAL

Título do projeto: Análise do Desempenho de Filtros Harmônicos Sintonizados e Eletromagnético  
De Sequência Zero

#### BANCA AVALIADORA

Membro 1: Antônio Melo de Oliveira

Membro 2: Euler Bueno dos Santos

Membro 3: Fernando Nunes Belchior

#### ESTUDANTES

Matrícula	Nome
201407744	Carlos Henrique Soares Tavares
201408066	Pedro henrique Alves Ribeiro

#### NOTAS

Matrícula	Membro 1				Membro 2				Membro 3				Média
	NPT	NTE	NAA	NF	NPT	NTE	NAA	NF	NPT	NTE	NAA	NF	
201407744		10,0	10,0	10,0		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
201408066		10,0	10,0	10,0		10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0

NPT – Nota plano de trabalho; NTE – Nota do trabalho escrito; NAA – Nota de apresentação e arguição

Para Eng. Elétrica, Mecânica e PFC2 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,1 \times NPT + 0,45 \times NTE + 0,45 \times NAA$

Para PFC1 da Eng. Da Computação:  $NF = 0,3 \times NPT + 0,7 \times NAA$

Goiânia, 09 de JULHO de 2019.

Antônio Melo de Oliveira  
Membro 1

Euler Bueno dos Santos  
Membro 2

Fernando Nunes Belchior  
Membro 3

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo realizar a comparação da filtragem de corrente harmônica de terceira ordem entre o filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético de sequência zero, para cargas equilibradas e cargas desequilibradas. Para este fim, foi necessário modelar uma carga não-linear que se apresenta com um alto nível de distorção harmônica, similar a diversas cargas monofásicas comuns em instalações elétricas de baixa tensão, como por exemplo prédios comerciais. Neste trabalho foi utilizado o software *MatLab*, especificamente um ambiente dentro do mesmo chamado *Simulink*, para realizar a modelagem da carga não-linear, do filtro passivo sintonizado e do filtro eletromagnético de sequência zero. Por fim, é certificado qual o filtro que deverá ser implementado para a carga em estudo, seja equilibrada ou desequilibrada.

**Palavras-chave:** Carga Equilibrada. Carga Desequilibrada. Filtro Eletromagnético de Sequência Zero. Filtro Passivo Sintonizado. Distorção harmônica. Cargas Lineares. Cargas Não-Lineares.

## ABSTRACT

The purpose of this work is to compare the third order harmonic current filtering between the tuned passive filter and the zero-sequence electromagnetic filter for balanced loads and unbalanced loads. To this end, it was necessary to model a non-linear load that presents a high level of harmonic distortion, it is very common at low-voltage electrical installations, such as commercial buildings. In this work, the MatLab software was used, specifically an environment within called Simulink, to perform the non-linear load and the tuned passive filtering model and the zero-sequence electromagnetic filter. Finally, it is certified which is the filter that should be implemented for the study load, be balanced or unbalanced.

**Key-words:** Balanced Load. Unbalanced load. Zero-Sequence Electromagnetic Filter. Passive Tuned Filter. Harmonic distortion. Linear loads. Non-linear loads.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>VI</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMÁRIO</b> .....	<b>VIII</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>14</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>17</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>18</b>
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	19
2.2 CARGAS LINEARES E NÃO-LINEARES .....	19
2.2.1 <i>Cargas Lineares</i> .....	19
2.2.2 <i>Cargas Não-Lineares</i> .....	20
2.3 CONCEITUAÇÃO DE HARMÔNICAS .....	21
2.4 FONTES NÃO-LINEARES.....	25
2.4.1 <i>Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico</i> .....	25
2.5 FILTROS HARMÔNICOS.....	27
2.5.1 <i>Tipos</i> .....	27
2.6 FILTROS PASSIVOS SINTONIZADOS .....	29
2.6.1 <i>Sintonia simples</i> .....	29
2.6.2 <i>Dupla sintonia</i> .....	29
2.6.3 <i>Passa-Alta</i> .....	30
2.6.4 <i>Amortecido tipo C</i> .....	30
2.7 FILTROS ELETROMAGNÉTICOS DE SEQUÊNCIA ZERO.....	32
2.8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	39
<b>3 MODELAGEM NO MATLAB-SIMULINK</b> .....	<b>40</b>
3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	40
3.2 O MATLAB-SIMULINK .....	40

3.3 CARGA EQUILIBRADA .....	43
3.4 CASO EQUILIBRADO – SITUAÇÃO ANTES DA CONEXÃO DOS FILTROS .....	45
3.4.1 Situação após conexão do filtro passivo sintonizado na terceira harmônica .....	48
3.4.2 Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero.....	52
3.5 CASO DESEQUILIBRADO – SITUAÇÃO ANTES DA CONEXÃO DOS FILTROS .....	55
3.5.1 Situação após conexão do filtro passivo sintonizado na terceira harmônica .....	58
3.5.2 Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero.....	63
3.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	68
<b>4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS FILTROS PASSIVO SINTONIZADO E ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO .....</b>	<b>69</b>
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS .....	69
4.2 CONCLUSÕES DO DESEMPENHO DO CASO EQUILIBRADO.....	69
4.2.1 Análise do filtro passivo sintonizado tipo-C, em 3ª harmônica.....	70
4.2.2 Análise do filtro eletromagnético de sequência zero.....	71
4.2.3 Comparação entre o filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético .	72
4.3 CONCLUSÕES DO DESEMPENHO DO CASO DESEQUILIBRADO.....	73
4.3.1 Análise do filtro passivo sintonizado tipo-C, em 3ª harmônica.....	73
4.3.2 Análise do filtro eletromagnético de sequência zero.....	74
4.3.3 Comparação entre o filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético .	75
4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	77
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>78</b>
<b>6 BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>79</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos gráficos de corrente e tensão em carga linear .....	19
Figura 2- Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não-linear.....	20
Figura 3 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier .....	21
Figura 4 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier e suas componentes simétricas .....	23
Figura 5 - Filtro passivo de sintonia simples .....	29
Figura 6 - Filtros passivos de dupla sintonia .....	30
Figura 7 - Filtro Passa-Alta.....	30
Figura 8 - Filtro tipo C.....	31
Figura 9 - Sistema elétrico trifásico com harmônicas “ <i>triplens</i> ” confinadas pelo filtro eletromagnético .....	32
Figura 10 - Circuito equivalente: alimentação, carga e filtro de sequência zero.....	33
Figura 11 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de sequência zero .....	35
Figura 12- Circuitos sequenciais não-acoplados para o filtro de sequência zero .....	37
Figura 13 - Fonte Trifásica .....	41
Figura 14 - Ramos RLC série/paralelo .....	41
Figura 15 - Ponte Retificadora Universal .....	42
Figura 16 - Barramento Trifásico .....	42
Figura 17 - Filtro Passivo tipo-C Trifásico.....	42
Figura 18 - Filtro Eletromagnético .....	43
Figura 19 - Carga trifásica não-linear .....	44
Figura 20 - Sistema para carga não-linear equilibrada .....	46
Figura 21 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase A .....	46
Figura 22 - Espectro harmônico de corrente nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C .....	47
Figura 23 - Gráfico de tensão nos barramentos B1 e B2 da fase A.....	47

Figura 24 - Espectro harmônico de tensão nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C .....	48
Figura 25 - Sistema com filtro passivo tipo-C conectado em paralelo .....	49
Figura 26 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada .....	51
Figura 27 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada.....	51
Figura 28 -Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada .....	52
Figura 29 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada.....	52
Figura 30 - Sistema com filtro eletromagnético de sequência zero conectado em paralelo .....	53
Figura 31 - Gráfico de corrente no barramento B1 das fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada .....	54
Figura 32 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada .....	54
Figura 33 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada .....	55
Figura 34 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada .....	55
Figura 35 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase A – carga desequilibrada.....	56
Figura 36 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase B – carga desequilibrada.....	56
Figura 37 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase C – carga desequilibrada.....	57
Figura 38 - Espectro harmônico de corrente nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C – carga desequilibrada.....	57
Figura 39 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	58
Figura 40 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase B, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	59

Figura 41 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	59
Figura 42 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	60
Figura 43 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	61
Figura 44 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase B, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	61
Figura 45 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	61
Figura 46 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada.....	62
Figura 47 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	63
Figura 48- Gráfico de corrente no barramento B1 da fase B, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	63
Figura 49 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	64
Figura 50 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	64
Figura 51 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	65
Figura 52 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase B, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	66
Figura 53 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	66
Figura 54 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada.....	67

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição sequencial para um sistema distorcido e desequilibrado .....	24
Tabela 2 - Distribuição sequencial para um sistema distorcido e equilibrado .....	24
Tabela 3 - Simulações dos retificadores monofásicos .....	45
Tabela 4 - Valores de corrente em fundamental e 3 <sup>a</sup> harmônica nos barramentos B1 e B3 após o acréscimo do filtro passivo – carga equilibrada .....	50
Tabela 5 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B1, após a conexão do filtro passivo – carga desequilibrada .....	60
Tabela 6 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B3, após a conexão do filtro passivo – carga desequilibrada .....	62
Tabela 7 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B1, após a conexão do filtro eletromagnético – carga desequilibrada .....	65
Tabela 8 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B3, após a conexão do filtro eletromagnético – carga desequilibrada .....	67
Tabela 9 - Corrente de pico nas situação antes e após a conexão de ambos os filtro - barramento B1 carga equilibrada.....	69
Tabela 10 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro passivo - barramento B1 carga equilibrada .....	71
Tabela 11 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro eletromagnético - barramento B1 carga equilibrada .....	72
Tabela 12 - Eficiência em relação ao nível de filtragem dos filtros – carga equilibrada .....	72
Tabela 13 - Corrente de pico nas situação antes e após a conexão de ambos os filtro - barramento B1 carga desequilibrada .....	73
Tabela 14 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro passivo - barramento B1 carga desequilibrada.....	74
Tabela 15 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro eletromagnético - barramento B1 carga desequilibrada.....	75
Tabela 16 - Eficiência em relação ao nível de filtragem dos filtros – carga desequilibrada .....	76
Tabela 17 – Média da eficiência da filtragem dos filtros – carga desequilibrada .....	76

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro possui frequência fundamental normalizada com tensão senoidal em 60 Hz. Ao conectar uma carga linear, as formas de onda de tensão e corrente apresentam um formato senoidal puro. Ao conectar uma carga não-linear, isto é, um dispositivo onde a tensão não é proporcional à corrente que por ele circula, a corrente e a tensão apresentarão formas de onda resultantes diferentes de uma onda senoidal pura. Nas formas de onda resultantes estarão presentes ondas senoidais com frequência fundamental (60 Hz) e suas múltiplas inteiras, denominadas harmônicas. A deformação no sinal resultante ocorre porque o sinal em frequência fundamental é somado vetorialmente com as demais harmônicas.

A presença de harmônicas em uma instalação pode resultar em alguns problemas, como o aquecimento excessivo de condutores, aumento de perdas em transformadores, disparo anormal de disjuntores e chaves, diminuição da vida útil de equipamentos, ressonância em bancos capacitivos, redução no rendimento de motores, valores incorretos apresentados pelos instrumentos de medição, entre outros [1]. Dessa forma, é necessário estudar soluções afim de mitigar os efeitos dessas harmônicas.

Em busca de reduzir o nível dessas harmônicas presentes nos sistemas, o uso de filtros capazes de filtrar as componentes harmônicas dessas correntes não-lineares se faz necessário para melhorar a qualidade da energia, no ponto de acoplamento da instalação. Dois exemplos capazes de filtrar, principalmente o nível de terceira harmônica, são os denominados filtros passivos sintonizados e filtros eletromagnéticos de sequência zero. Este trabalho possui como principal objetivo comparar qual destes possui o melhor desempenho neste aspecto.

O capítulo 2 abordará a fundamentação teórica necessária para a compreensão do trabalho, mais especificamente sobre carga lineares e não-lineares, conceituação de harmônicas, filtros harmônicos com enfoque nos filtros passivos sintonizados e eletromagnético de sequência zero.

O capítulo 3 terá como principais temas uma apresentação breve do software *MatLab*, a modelagem e os gráficos de corrente dos sistemas equilibrados e desequilibrados, antes e após a conexão dos filtros.

O capítulo 4 terá como finalidade analisar o desempenho de ambos filtros, afim de comparar qual deles possui melhor eficiência.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Considerações Iniciais

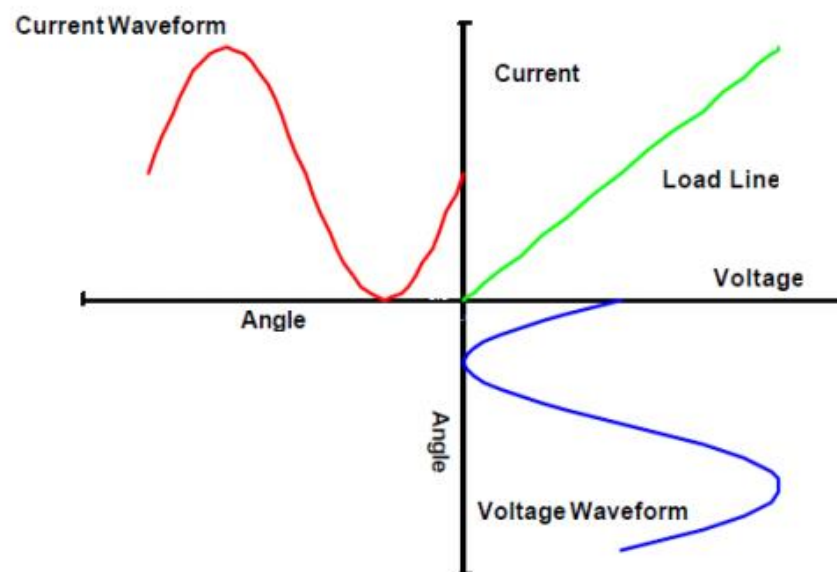
Nesta Seção 2, serão apresentadas algumas definições a fim de facilitar a compreensão deste trabalho.

### 2.2 Cargas Lineares e Não-Lineares

#### 2.2.1 Cargas Lineares

Dispositivos denominados cargas elétricas, ditos como lineares, podem ser definidos como cargas elétricas que, em suas estáveis condições operacionais, podem ser modelados por indutores, capacitores e resistores, apresentando uma impedância constante para a fonte de energia em todo o ciclo de tensão aplicada. Ou seja, apresenta uma relação linear entre tensão e corrente na sua frequência nominal [2]. A Figura 1 representa o comportamento de cargas lineares.

Figura 1 - Exemplos gráficos de corrente e tensão em carga linear



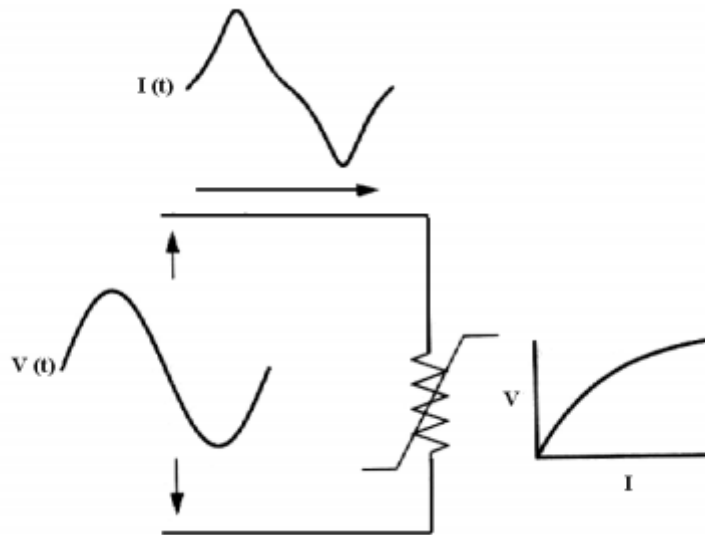
Fonte: adaptado de [2]

### 2.2.2 Cargas Não-Lineares

São cargas elétricas que solicitam corrente de forma descontínua ou que variam sua impedância durante um ciclo da forma de onda da tensão de alimentação. [3] A Figura 2 representa o comportamento entre tensão e corrente das cargas não-lineares.

Podem ser explicadas também como cargas onde a forma de onda da corrente de regime não “segue” a forma de onda da tensão de alimentação. [4]

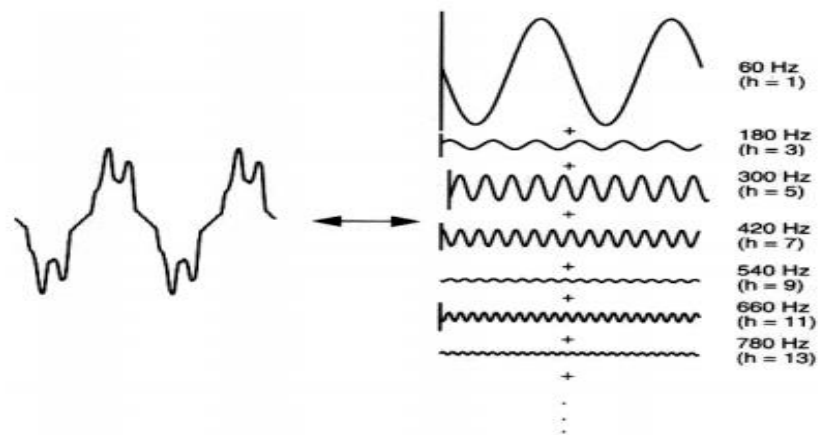
Figura 2- Comportamento tensão x corrente de um dispositivo não-linear



Fonte: retirado de [5]

As cargas elétricas não lineares representam um dos principais fatores responsáveis pela presença de correntes resultantes não senoidais nas redes de distribuição, mesmo quando sua tensão de alimentação é puramente senoidal [6]. É conhecido que uma onda não-senoidal pode ser representada como uma somatória de ondas senoidais puras, cada qual constituída por uma frequência múltipla inteira da frequência fundamental da onda original. Esta interpretação advém da conhecida Série de Fourier, a qual é graficamente ilustrada na Figura 3.

Figura 3 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier



Fonte: retirado de [5]

### 2.3 Conceituação de Harmônicas

A geração de eletricidade normalmente acontece em frequências constantes de 50 Hz ou 60 Hz e o sinal de tensão gerado pode ser considerável praticamente senoidal. Entretanto, quando essa tensão é aplicada a uma carga de comportamento não linear ocasiona a circulação de uma corrente de mesma característica. Sabe-se que o sistema de suprimento possui impedâncias que percorridas pelas correntes não lineares, quedas de tensão não senoidais ocorrerão na rede produzindo, assim, distorção de tensão nos barramentos.

A análise harmônica se trata do processo de cálculo das magnitudes e fases dos sinais elétricos de frequências múltiplas inteiras da fundamental. Uma metodologia amplamente difundida no estudo de poluição harmônica é a conhecida série de Fourier. Esta, apresentada em 2-1, estabelece uma relação entre uma função no domínio do tempo e no domínio da frequência [2].

$$x(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left( a_h \cos \left( \frac{2\pi ht}{T} \right) + b_h \sin \left( \frac{2\pi ht}{T} \right) \right) \quad 2-1$$

Onde  $a_0$  é o valor médio da função  $x(t)$ , enquanto  $a_n$  e  $b_n$ , coeficientes da série, são componentes retangulares da  $h^{\text{ésima}}$  harmônica, conforme a expressão 2-2.

$$A_h \angle \phi_h = a_h + j b_h \quad 2-2$$

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental [7]. Como forma de quantificar a presença de distorções harmônicas nos sinais de tensões e/ou correntes, utiliza-se da denominada “Distorção Harmônica Total”, sendo uma das designações mais utilizadas no meio técnico/científico. Utilizando de propostas de convenção dotadas em [5], as equações sintetizam tais definições.

$$DTHT = \sqrt{\sum_{h \geq 2}^{hmáx} (V_h \%)^2} \quad 2-3$$

$$DIHT = \sqrt{\sum_{h \geq 2}^{hmáx} (I_h \%)^2} \quad 2-4$$

Onde:

DTHT – distorção de tensão harmônica total [%];

DIHT – distorção de corrente harmônica total [%];

$V_h \%$  =  $100 \frac{V_h}{V_1}$  - tensão harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];

$V_h$  - tensão harmônica de ordem h [V];

$V_1$  - tensão fundamental [V];

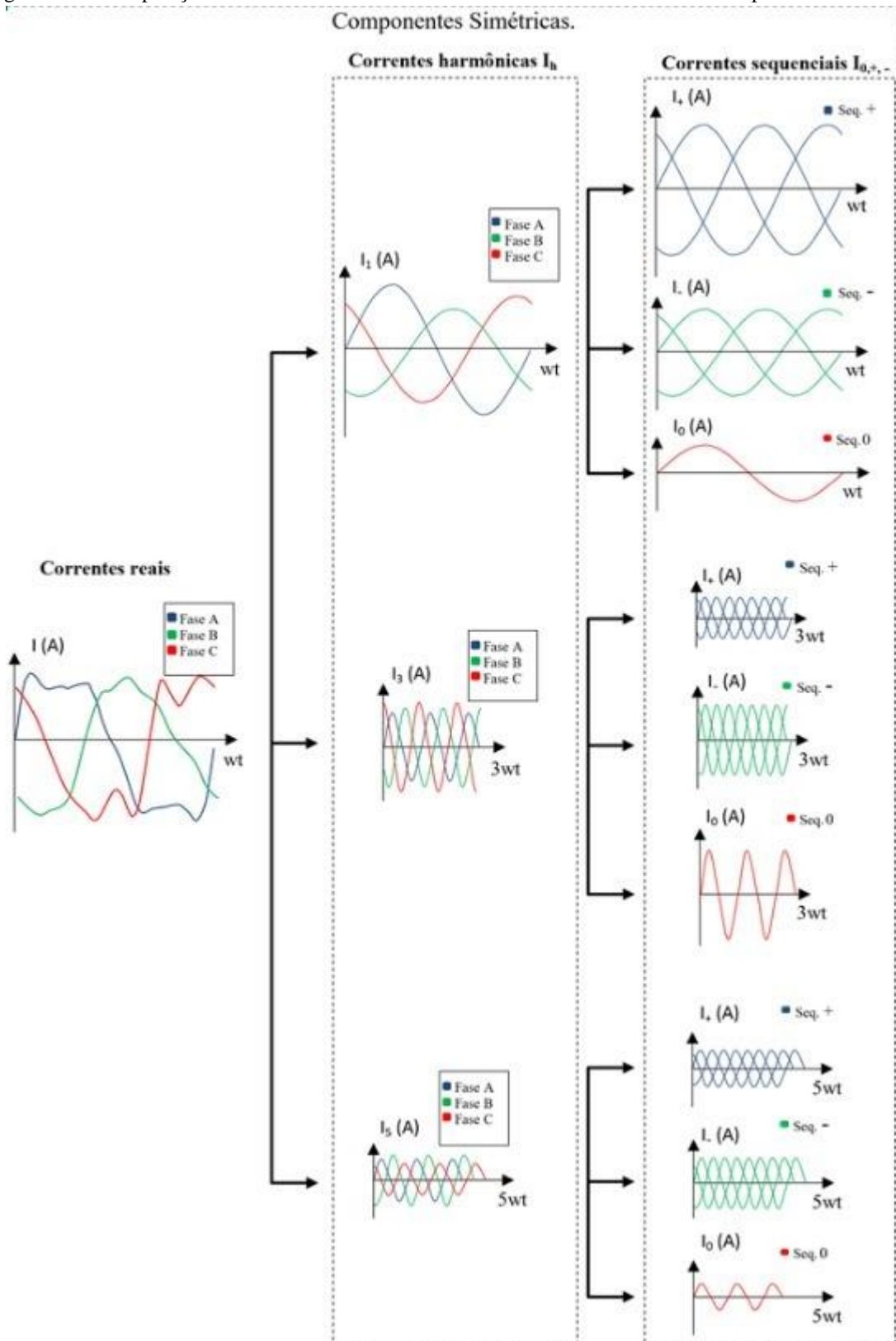
$I_h \%$  =  $100 \frac{I_h}{I_1}$  - corrente harmônica de ordem h em porcentagem da fundamental [%];

$I_h$  - corrente harmônica de ordem h [A];

$I_1$  - corrente fundamental [A].

De acordo com a Figura 4, aplicando-se o teorema de Fourier, tem-se, para este caso, n sistemas trifásicos, senoidais e desequilibrados para diversas frequências múltiplas da fundamental, representando as ordens harmônicas. Cada um dos sistemas propriamente ditos pode ser reescrito através da soma de outros três sistemas trifásicos, senoidais e equilibrados, denominados componentes de sequência positiva, negativa e nula, esta decomposição é chamada de componentes simétricas [6].

Figura 4 - Decomposição de uma forma de onda através da série de Fourier e suas componentes simétricas



Fonte: retirado de [6]

Em sistemas trifásicos, distorcidos e desequilibrados tem-se, como mencionado, três sistemas sequenciais equilibrados, por intermédio das Séries de Fourier e das componentes simétricas, contudo cada ordem harmônica apresenta propriedades sequenciais distintas. A componente de sequência positiva, comparada às demais componentes sequenciais, apresenta maior amplitude para a componente fundamental (quando adotada com a mesma sequência do sistema real), assim a sequência negativa é predominante na harmônica de segunda ordem, bem como a componente de sequência nula para a terceira, repetindo-se o ciclo conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Distribuição sequencial para um sistema distorcido e desequilibrado

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h
Seq. +	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Seq. -	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Seq. 0	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: adaptado de [6]

Em sistemas trifásicos, distorcidos e equilibrados observa-se a presença de apenas uma componente sequencial para cada ordem harmônica. Logo, pode-se concluir que para estes sistemas, tem-se a seguinte distribuição sequencial, de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Distribuição sequencial para um sistema distorcido e equilibrado

	1h	2h	3h	4h	5h	6h	7h	8h	9h
Seq. +	✓			✓			✓		
Seq. -		✓			✓			✓	
Seq. 0			✓			✓			✓

Fonte: adaptado de [6]

As componentes de sequência zero, predominantemente presentes na terceira harmônica e suas múltiplas, denominadas *triplens*, recebem uma atenção especial neste trabalho, pelo fato de apresentar, na maioria dos casos, amplitude mais significativa com relação às demais, quando se trata de harmônicas geradas por cargas não lineares conectadas entre fase e neutro.

As correntes de sequência zero são encontradas nas redes de distribuição, especificamente, na baixa tensão, conseqüentes de cargas conectadas entre fase e neutro. Devido as suas propriedades características, como, por exemplo, mesmo ângulo de fase para as três fases, em sistemas no qual são utilizados transformadores conectados em triangulo estrela, a componente propriamente dita é triplicada no neutro do sistema e não flui para o lado da média tensão, provocando, respectivamente, diferença de potencial entre os condutores neutro e terra do sistema, bem como sobreaquecimento no primário do transformador.

## 2.4 Fontes Não-Lineares

Fontes chamadas não-lineares são também conhecidas como fontes capazes de produzir deformações, e assim, correntes harmônicas. A maioria delas são conversores estáticos, os quais podem ser de grande potência e em pequena quantidade ou de baixa potência e em grande quantidade. Alguns exemplos de cargas deformantes são: lâmpadas fluorescentes, *dimmers*, computadores, eletrodomésticos.

No setor industrial, pode-se citar os variadores de velocidade (inversores de frequência), *soft starters*, fornos de indução, fornos a arco voltaico, controladores de tensão, retificadores, dentre outros.

### 2.4.1 Efeitos de harmônicas em componentes do sistema elétrico

O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes [8].

Em motores e geradores, chamadas de máquinas de indução, o maior efeito se dá no aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e cobre. Afetando diretamente sua eficiência e seu torque disponível.

Em transformadores, no geral, se assemelha muito às consequências dos efeitos causados nos motores e geradores. Entretanto, além das mesmas, tem-se o efeito onde as reatâncias de dispersão são ampliadas, haja vista que seu valor aumenta com a frequência. Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas (entre espiras e entre enrolamento) que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo.

Cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às harmônicas de corrente, isso devido ao efeito que restringe a seção condutora dos mesmos para componentes de frequência elevada.

Os capacitores possuem um grande problema devido à possibilidade do efeito da ressonância, que é excitado pelas harmônicas, podendo-se produzir níveis elevados de tensão e/ou corrente. Outro fator está intrinsicamente ligado à reatância capacitiva, haja vista que a mesma diminui conforme a frequência, tendo, assim, um aumento nas correntes devidos às harmônicas presentes na tensão. As correntes de alta frequência, que encontrarão um caminho de menor impedância pelos capacitores, elevarão as suas perdas ôhmicas. O decorrente aumento no aquecimento do dispositivo encurta a vida útil do capacitor.

Alguns equipamentos podem ser muito sensíveis a distorções na forma de onda de tensão. Caso as harmônicas penetrem na alimentação do equipamento por meio de acoplamentos indutivos e capacitivos (que se tornam mais efetivos com a aumento da frequência), eles podem também alterar o bom funcionamento do aparelho.

Aparelhos de medição e instrumentação em geral são afetados por harmônicas, especialmente se ocorrerem ressonâncias que afetam a grandeza medida.

Por fim, porém não menos importantes, relés de proteção e fusíveis também são afetados pelas componentes harmônicas de corrente presentes no sistema, devido ao aquecimento destes dispositivos, ocasionando na redução em sua vida útil e, eventualmente, sua operação inadequada [8].

## 2.5 Filtros Harmônicos

Embora as cargas não lineares estejam cada vez mais presentes nos sistemas elétricos, existem métodos para reduzir os componentes harmônicos nesses sistemas, com o intuito de restaurar a integridade das formas de onda de tensão e corrente. A análise harmônica de sistemas elétricos, por sua vez, requer inicialmente a identificação dos pontos críticos do sistema em relação à inserção de componentes harmônicos. Muitos estudos são feitos para detectar fontes de distorção harmônica, utilizando algoritmos computacionais avançados ou técnicas de redes neurais artificiais. Quando as fontes harmônicas em um sistema elétrico são encontradas, deve-se propor soluções para a redução da distorção harmônica causada pelas mesmas [9]. Dentre as medidas possíveis, uma das mais eficazes e importantes consiste da instalação de filtros harmônicos nos circuitos de potência.

Filtros harmônicos são como “amortecedores de impacto” da eletricidade e trabalham no princípio de que indutores e capacitores conectados juntos vão bloquear a corrente harmônica ou desviá-la para a terra [4]. O objetivo fundamental de um filtro harmônico consiste em reduzir a amplitude de uma ou mais correntes ou tensões harmônicas, em uma determinada parte do sistema.

Existem também outras técnicas para a redução dos componentes harmônicos presentes no sistema elétrico, como por exemplo, ao identificar o equipamento que está sendo afetado, reajusta-lo de forma a que não seja mais afetado pelas harmônicas. Uma forma de reajustamento seria, na maioria dos casos, o engenheiro mudar o tamanho da bitola do fio condutor neutro para que seja largo o suficiente a fim do mesmo ter a capacidade de suportar maior corrente, causado pela presença das harmônicas *triplens* (3ª, 6ª, 9ª, e assim por diante), assim podendo prevenir o gasto de comprar outro equipamento. Porém, neste trabalho, estar-se-á apresentando exclusivamente as soluções designadas pelos filtros harmônicos.

### 2.5.1 Tipos

Quanto à tecnologia aplicada, existem 3 tipos de filtros, são eles:

- **Filtros Passivos:** São os construídos apenas com os elementos passivos, ou seja, resistores, capacitores e indutores.

- **Filtros Ativos:** São os que empregam na sua construção elementos passivos que estão de certa forma associados a algum elemento ativo amplificador, como transistores e amplificadores operacionais.
- **Filtro Eletromagnéticos:** São os dispositivos cujo princípio de filtragem é baseado no eletromagnetismo, através da utilização correta de enrolamentos dispostos em materiais magnéticos. Pode ser para filtragem de correntes harmônicas de sequência positiva e negativa ou filtragem de correntes harmônicas de sequência zero.

Os filtros formados por elementos R, L e C, em seu circuito ressonante, em série ou combinações série-paralela destes, são chamados de filtros sintonizados. Nestes filtros, os elementos capacitivos e indutivos são escolhidos de modo que os circuitos apresentem uma, duas ou três frequências de ressonância.

Uma das formas para a atenuação da injeção de componentes harmônicas de corrente em redes elétricas de suprimento fundamenta-se no emprego de dispositivos eletromagnéticos. Estes, uma vez concebidos, projetados e construídos em consonância com seus objetivos específicos, podem ser classificados em dois grandes grupos: um primeiro voltado para o controle das componentes de sequência zero e um segundo destinado à atenuação das componentes de sequência positiva e negativa.

O enfoque desse trabalho está em cima dos filtros passivos sintonizados e filtros eletromagnéticos de sequência zero, presentes nas seções 2.6 e 2.7, responsáveis pela filtragem das correntes harmônicas supracitadas acima, a partir da tese [5]. Esta consiste no uso de enrolamentos eletromagnéticos interligados em ziguezague, com os quais se consegue um dispositivo capaz de oferecer um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de sequência zero.

## 2.6 Filtros passivos sintonizados

### 2.6.1 Sintonia simples

Também conhecidos como filtros *shunt* ressonantes, caracterizam-se por serem filtros passa-faixa, proporcionando uma redução da impedância para a frequência que se deseje filtrar, de modo a desviar as correntes indesejadas para a terra. São os filtros passivos mais utilizados.

A Figura 5 mostra a configuração do filtro passivo de sintonia simples.

Figura 5 - Filtro passivo de sintonia simples



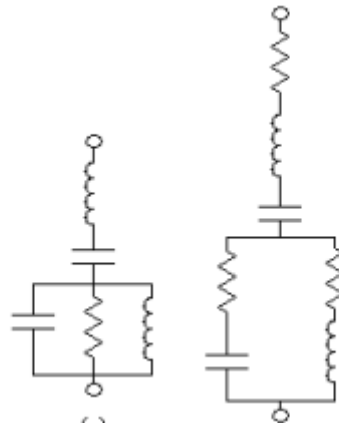
Fonte: retirado de [10]

### 2.6.2 Dupla sintonia

É um filtro cujo custo benefício é mais atraente, pois possui característica de sintonia para duas frequências ao mesmo tempo: os elementos séries sintonizam uma frequência ressonante e os em paralelo sintonizam a segunda frequência.

A Figura 6 mostra as possíveis configurações do filtro passivo de dupla sintonia.

Figura 6 - Filtros passivos de dupla sintonia



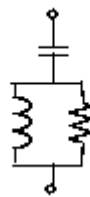
Fonte: retirado de [10]

### 2.6.3 Passa-Alta

O filtro passa-alta é um filtro de sintonia simples onde a indutância e resistência são conectadas em paralelo ao invés de em série. Essa conexão resulta impedância em altas frequências, limitada pela resistência.

A Figura 7 mostra a configuração do filtro passivo passa-alta.

Figura 7 - Filtro Passa-Alta



Fonte: Os Autores

### 2.6.4 Amortecido tipo C

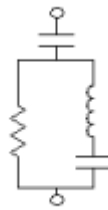
Os filtros amortecidos são formados por capacitores, indutores e resistores em diferentes instalações e caracterizam-se por possuírem baixa impedância para frequências maiores que uma determinada frequência de corte.

O filtro tipo C apresenta maior redução das perdas para a frequência fundamental dentre todos os demais filtros. Seu desempenho de filtragem do nível de 3ª harmônica é relativamente maior que o dos outros filtros citados acima. Uma de suas principais características é a maior suscetibilidade a desvios na frequência fundamental e a variações nos valores dos componentes. Este filtro é uma variação do filtro passa-alta, onde a indutância é substituída por uma conexão série de indutância e resistência (LC), sintonizados na frequência fundamental. Nela, a resistência é, então, contornada pela ressonância do circuito LC e as perdas são nulas.

Portanto, neste trabalho, pelos motivos supracitados, a escolha para filtragem de terceira harmônica, através de um filtro passivo sintonizado, dá-se pelo filtro tipo C.

A Figura 8 mostra a configuração do filtro passivo tipo C.

Figura 8 - Filtro tipo C



Fonte: Os Autores

As equações que dimensionam a ordem harmônica a ser filtrada ( $n$ ), o fator de qualidade ( $Q$ ), potência ativa, i. e., perda ( $P$ ) e reativa ( $Qc$ ) na frequência fundamental são descritas a seguir.

$$n = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad 2-5$$

$$Q = \frac{R}{(L * 2\pi f_n)} \quad 2-6$$

$$Qc = \frac{V^2}{X_C} * \frac{n^2}{(n^2 - 1)} \quad 2-7$$

$$P = \frac{Qc}{Q} * \frac{n}{(n^2 - 1)} \quad 2-8$$

Onde:

$f_1$  – frequência fundamental [Hz];

$\omega$  – frequência angular fundamental [rad/s];

$f_n$  – frequência sintonizada [Hz];

$n$  – ordem harmônica ( $f_n/f_1$ );

$V$  – tensão nominal de fase [V];

$X_L$  – reatância indutiva na frequência fundamental [ $\Omega$ ];

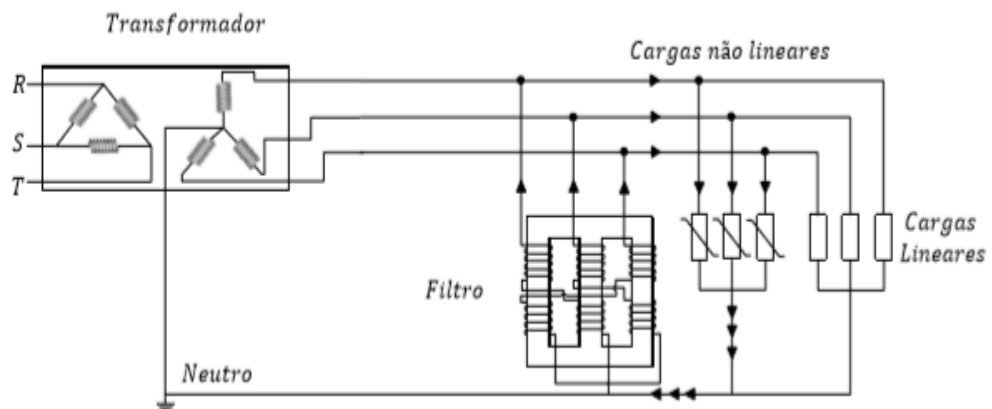
$X_C$  – capacitância indutiva na frequência fundamental [ $\Omega$ ];

## 2.7 Filtros eletromagnéticos de sequência zero

Exclusivamente para a mitigação de harmônicas compostas predominantemente pela componente de sequência zero, dispositivos eletromagnéticos tornam-se cada vez mais promissores [5].

Para a atenuação das harmônicas *triplens*, apresenta-se, de acordo com a Figura 9, o filtro eletromagnético de sequência zero, submetido a um acoplamento magnético ideal.

Figura 9 - Sistema elétrico trifásico com harmônicas “triplens” confinadas pelo filtro eletromagnético



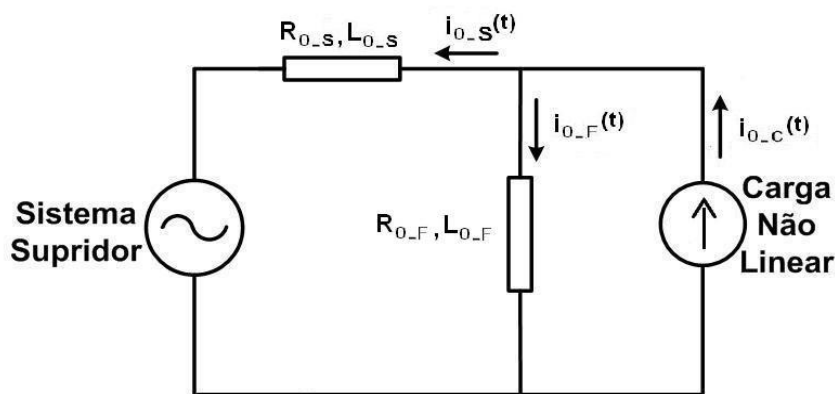
Fonte: retirado de [11]

O filtro em análise confina toda sequência zero presente em qualquer ordem harmônica da corrente não senoidal. Para o caso em que haja um sistema distorcido, porém equilibrado,

como na Tabela 2, o dispositivo eletromagnético, de menor custo e maior robustez, filtrará a terceira harmônica e todas as suas múltiplas, enquanto que os filtros ressonantes filtrarão apenas a ordem para o qual foram sintonizados. Para um sistema distorcido e desequilibrado, onde há a presença das três componentes sequenciais em cada ordem harmônica, como o caso da Figura 4, o filtro eletromagnético permanece com o mesmo rendimento, porém o seu impacto sobre sistema é reduzido, uma vez que as componentes de sequência positiva e negativa não são mitigadas [5].

É possível observar que o desempenho do filtro possui forte dependência com a relação entre a sua impedância e a impedância do sistema, como sugere o circuito equivalente simplificado de sequência zero ilustrado na Figura 10.

Figura 10 - Circuito equivalente: alimentação, carga e filtro de sequência zero



Fonte: retirado de [5]

A partir do divisor de corrente identificado na Figura 10, constata-se que a corrente que se estabelece através do filtro eletromagnético de sequência zero é dada pela equação 2-9:

$$i_{0_F}(t) = \frac{Z_{0_S}}{Z_{0_S} + Z_{0_F}} \cdot i_{0_C} \quad 2-9$$

Sendo:

$i_{0_C}(t)$ - Corrente de sequência zero gerada pela carga não-linear [A];

$i_{0_F}(t)$ - Corrente de sequência zero através do filtro de sequência zero [A];

$Z_{0_S}$  - Impedância de sequência zero do sistema de suprimento ( $R_{0_S}, L_{0_S}$ ) [ $\Omega$ ];

$Z_{0_F}$ - Impedância de sequência zero do filtro de sequência zero ( $R_{0_F}, L_{0_F}$ ) [ $\Omega$ ];

A equação 2-10 revela que, quanto menor a impedância de sequência zero do filtro, em relação à mesma impedância do sistema de alimentação, maior será sua eficiência em drenar as correntes harmônicas de sequência zero. Por outro lado, a corrente injetada na rede de suprimento, com a inserção do filtro em paralelo, pode ser calculada por:

$$i_{0_S}(t) = \frac{Z_{0_F}}{Z_{0_F} + Z_{0_S}} \cdot i_{0_C} \quad 2-10$$

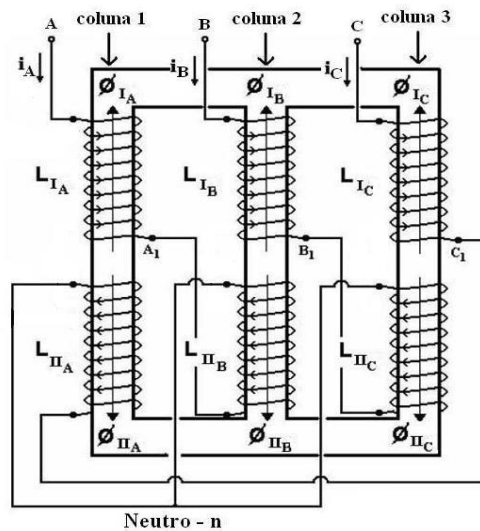
Sendo:

$i_{0_S}(t)$ - Corrente de sequência zero gerada pela carga não-linear [A];

Mais uma vez, a equação 2-10 evidencia que a corrente de sequência zero que se estabelece no sistema de suprimento será tão menor quanto maior a impedância de sequência zero do sistema quando comparada com a impedância de sequência zero do filtro. Esta situação nem sempre pode ser encontrada na prática, pois dependerá fortemente do local onde o filtro é instalado no sistema elétrico.

No que tange ao arranjo trifásico para o filtro em questão este é constituído por um núcleo trifásico de 3 colunas junto aos quais são inseridos, por fase, dois conjuntos de bobinas com polaridades opostas. Conectando-se tais enrolamentos de acordo com a clássica designação zig-zague, obtém-se a composição ilustrada na sequência através da Figura 11. Nas mesmas figuras ficam ainda esclarecidas as convenções utilizadas para a representação dos efeitos magnéticos dos diferentes acoplamentos e de dispersão.

Figura 11 - Arranjo físico trifásico do filtro eletromagnético de sequência zero



Fonte: retirado de [5].

Sendo:

$L_{I,1}; L_{I,2}; L_{I,3}$ ; - Indutância própria do enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

$L_{II,1}; L_{II,2}; L_{II,3}$ ; - Indutância própria do enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

$L_M$  - Indutância mútua entre os enrolamentos I e II de mesma coluna;

$M_{I,I}$  - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I nas três colunas;

$M_{II,II}$  - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos II nas três colunas;

$M_{I,II}$  e  $M_{II,I}$  - Indutâncias mútuas entre os enrolamentos I e II transversais nas três colunas;

$\Phi_{I,1}; \Phi_{I,2}; \Phi_{I,3}$ ; - Fluxo referente ao enrolamento I das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

$\Phi_{II,1}; \Phi_{II,2}; \Phi_{II,3}$ ; - Fluxo referente ao enrolamento II das colunas 1, 2 e 3, respectivamente;

Como pode ser visto, cada coluna é enlaçada por dois enrolamentos, denominados por I e II, construídos com o mesmo número de espiras e ligados em ziguezague. Desta forma, cada coluna magnética apresentará uma força magnetomotriz (FMM) resultante de duas fontes, as quais combinam os correspondentes efeitos da corrente de linha. Esta interação, aliada às considerações construtivas e operacionais do sistema elétrico, deve conduzir a um caminho de baixa impedância para as componentes de sequência zero. O motivo disto está atrelado ao fato

que esta impedância irá concorrer com a impedância do sistema de fornecimento, servindo como caminho alternativo às correntes enfocadas.

$$V_{AAT}(t) = L_{IA} \cdot \frac{di_A}{dt} + M_{I,IIAB} \cdot \frac{di_A}{dt} + M_{I,IIAC} \cdot \frac{di_B}{dt} - L_{MA} \cdot \frac{di_C}{dt} - M_{I,IAB} \cdot \frac{di_B}{dt} - M_{I,IAC} \cdot \frac{di_C}{dt} \quad 2-11$$

$$V_{BBT}(t) = L_{IB} \cdot \frac{di_B}{dt} + M_{I,IIBC} \cdot \frac{di_B}{dt} + M_{I,IIBA} \cdot \frac{di_C}{dt} - L_{MB} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,IAB} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,IBC} \cdot \frac{di_C}{dt} \quad 2-12$$

$$V_{CCT}(t) = L_{IC} \cdot \frac{di_C}{dt} + M_{I,IICA} \cdot \frac{di_C}{dt} + M_{I,IICB} \cdot \frac{di_A}{dt} - L_{MC} \cdot \frac{di_B}{dt} - M_{I,IAC} \cdot \frac{di_A}{dt} - M_{I,ICB} \cdot \frac{di_B}{dt} \quad 2-13$$

Matricialmente, empregando técnicas de modelagem no domínio da frequência, para uma ordem harmônica genérica  $h$ , tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{AAI} \\ \dot{V}_{BBI} \\ \dot{V}_{CCI} \end{bmatrix}_h = j\omega h \begin{bmatrix} (L_{IA} + M_{I,IIAB}) & -(M_{I,IAB} - M_{I,IIAC}) & -(L_{MA} + M_{I,IAC}) \\ -(L_{MB} + M_{I,IAB}) & (L_{IB} + M_{I,IIBC}) & -(M_{I,IBC} - M_{I,IIBC}) \\ -(M_{I,IAC} - M_{I,IICB}) & -(L_{MC} + M_{I,ICB}) & (L_{IC} + M_{I,IICA}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad 2-14$$

Analogamente, as tensões das bobinas II das fases A, B e C, na forma matricial, para uma ordem genérica  $h$ , podem ser expressas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{AII} \\ \dot{V}_{BII} \\ \dot{V}_{CII} \end{bmatrix}_h = j\omega h \begin{bmatrix} (L_{II} + M_{II,IAB}) & -(L_{MB} - M_{II,IIBC}) & -(M_{II,IIBA} - M_{II,IBC}) \\ -(M_{II,IICB} - M_{II,IAC}) & (L_{IC} + M_{II,ICB}) & -(L_{MC} + M_{II,IICA}) \\ -(L_{MA} - M_{II,IIAB}) & -(M_{II,IIAC} - M_{II,IAB}) & (L_{IA} + M_{II,IAC}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad 2-15$$

No que tange às tensões nas fases A, B e C, estas podem ser dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{An} \\ \dot{V}_{Bn} \\ \dot{V}_{Cn} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} \dot{V}_{AAI} \\ \dot{V}_{BBI} \\ \dot{V}_{CCI} \end{bmatrix}_h + \begin{bmatrix} \dot{V}_{AII} \\ \dot{V}_{BII} \\ \dot{V}_{CII} \end{bmatrix}_h = \begin{bmatrix} Z_{AA} & -Z_{AB} & -Z_{AC} \\ -Z_{BA} & Z_{BB} & -Z_{BC} \\ -Z_{CA} & -Z_{CB} & Z_{CC} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_A \\ \dot{I}_B \\ \dot{I}_C \end{bmatrix}_h \quad 2-16$$

Onde:

$$Z_{AA} = j\omega h \cdot (L_{IA} + L_{II} + M_{I,IIAB} + M_{II,IAB}) \quad 2-17$$

$$Z_{BB} = j\omega h. (L_{IB} + L_{IIC} + M_{I,II_{BC}} + M_{II,I_{CB}}) \quad 2-18$$

$$Z_{CC} = j\omega h. (L_{IC} + L_{IIA} + M_{I,II_{CA}} + M_{II,I_{AC}}) \quad 2-19$$

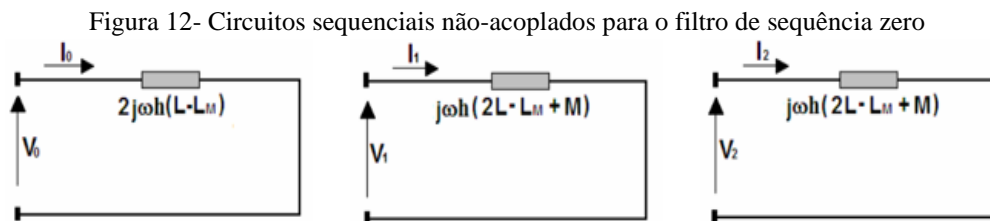
Admitindo-se que as bobinas I e II sejam idênticas, tem-se:

$$L_{IA} = L_{IB} = L_{IC} = L_{IIA} = L_{IIB} = L_{IIC} = L \quad 2-20$$

A partir de manipulações matemáticas e matriciais, utilizando-se também da teoria de componentes simétricas, obtém-se um resultado matricial mostrado em [5], que resulta na matriz de tensões e correntes sequenciais, onde essas se relacionam por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}_h = j\omega h \begin{bmatrix} 2(L - L_M) & 0 & 0 \\ 0 & 2L - L_M + M & 0 \\ 0 & 0 & 2L - L_M + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}_h \quad 2-21$$

A equação 2-21 sugere a existência de circuitos sequenciais não-acoplados, como mostrado na Figura 12.



Fonte: retirado de [5].

Para o caso particular onde  $L = L_M$ , tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}_h = j\omega h \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & L + M & 0 \\ 0 & 0 & L + M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix}_h \quad 2-22$$

A equação matricial 2-22 conduz a:

$$V_0 = 0 \quad 2-23$$

$$\dot{V}_1 = j\omega h I_1 (L + M) \quad 2-24$$

$$\dot{V}_2 = j\omega h I_2 (L + M) \quad 2-25$$

A partir das equações 2-23 a 2-28 é possível obter as impedâncias sequenciais, sob estas condições simplificadoras:

$$Z_0 = 0 \quad 2-26$$

$$Z_1 = j\omega h (L + M) \quad 2-27$$

$$Z_2 = j\omega h (L + M) \quad 2-28$$

A partir das equações 2-26 a 2-28 é possível verificar a propriedade principal dos filtros de sequência zero aqui focado, ou seja,  $Z_0=0$ .

Outro caminho para tal constatação é possível de obter a partir do equacionamento que se segue. Sabendo-se que  $V_{ABC} = TV_{012}$ , e combinando-se as equações 2-23 a 2-25 chega-se a:

$$\dot{V}_{A_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L + M) (2\dot{I}_A - \dot{I}_B - \dot{I}_C) \quad 2-29$$

$$\dot{V}_{B_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L + M) (2\dot{I}_B - \dot{I}_C - \dot{I}_A) \quad 2-30$$

$$\dot{V}_{C_n} = \frac{1}{3} j\omega h (L + M) (2\dot{I}_C - \dot{I}_A - \dot{I}_B) \quad 2-31$$

Aplicando as expressões 2-29 a 2-31 acima para uma componente particular de sequência zero, no caso  $h = 3$ , obtém-se:

$$V_{A_n} = j\omega(L + M)(2I_A - I_B - I_C) \quad 2-32$$

$$V_{B_n} = j\omega(L + M)(2I_B - I_C - I_A) \quad 2-33$$

$$V_{C_n} = j\omega(L + M)(2I_C - I_A - I_B) \quad 2-34$$

Novamente, as equações 2-32 a 2-34 evidenciam que as composições fasoriais das correntes harmônicas de ordem 3 resultam em tensões de terceiro harmônico nulas. Como apresentado nas equações 2-26 a 2-28, a interpretação física para o resultado anterior é que, para a frequência em questão, a impedância de sequência zero é igual à zero. Pode-se dizer então, se esta situação ocorrer, que o dispositivo proposto representa um curto-circuito para todas as correntes de sequência zero, sendo, portanto, um filtro ideal para esta sequência.

## 2.8 Considerações Finais

Após compreendida as definições apresentadas nesta Seção 2, o leitor está apto a progredir na leitura deste trabalho.

## 3 MODELAGEM NO MATLAB-SIMULINK

### 3.1 Considerações Iniciais

Nesta Seção 3, serão apresentados os sistemas de estudo dos casos equilibrados e desequilibrados.

### 3.2 O Matlab-Simulink

A simulação e design de modelos matemáticos para sistemas físicos vem sendo o método mais utilizado para análise comportamental de sistemas dinâmicos. Partindo desta premissa, o presente trabalho utiliza do software *MatLab*, especificamente um ambiente dentro do mesmo chamado *Simulink*, para realizar as simulações de estudo de caso na qual serão analisadas dentro desta tese.

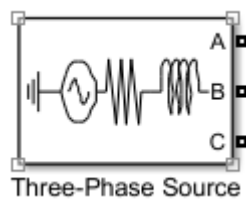
O *MatLab* é um software de programação de alto nível, que possui características de aplicativo (facilidade para o usuário) e de linguagem de programação (flexibilidade). O *Simulink* é, de certa forma, um aplicativo dentro do *MatLab* no qual permite analisar o comportamento de sistemas dinâmicos, como dito no parágrafo anterior, a partir construção do modelo matemático. Esta construção se dá através da construção de diagramas de blocos que são simulados no *MatLab*.

Como circuitos elétricos se tratam de sistemas dinâmicos, i.e., sistema cuja saída (ambos estado e resultado) muda ao longo do tempo, faz-se uso do ambiente *Simulink* que é capaz de modelar, simular e analisar o comportamento de sistemas dinâmicos, para promover as simulações dos circuitos em estudo. Cada bloco utilizado para a construção dos circuitos (ou diagramas) representa uma operação matemática de entrada e saída denominada função de transferência do bloco. Assim, o usuário é capaz de “arrastar e largar” os blocos dentro da interface de simulação, sendo capaz de interligá-los, a fim de montar um circuito elétrico.

Dentro da simulação, alguns blocos básicos que compõem nosso sistema são: *Three-Phase Source* (Fonte de Tensão Trifásica, Figura 13), que é a fonte de geração de energia para o sistema; *Series/Parallel RLC Branch* (Ramo RLC, Figura 14) que é usado para representar os elementos passivos, resistor, capacitor e indutor, tanto da forma série como paralelo; *Universal*

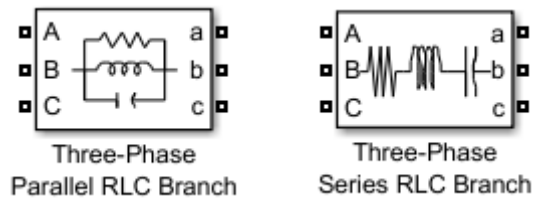
*Bridge* (Ponte Universal, Figura 15), usada para representar a ponte retificadora monofásica; *Three-Phase VI Measurement* (Medidor de Tensão e Corrente Trifásica ideal, Figura 16), usado como barramento, mas também, para medir os valores de tensão e corrente; *Three-Phase Harmonic Filter* (Filtro Harmônico Trifásico, Figura 17), utilizado para representar o filtro harmônico passivo sintonizado; e por último, o *Three-Phase Transformer 12 Terminals* (Transformador Trifásico de 12 terminais, Figura 18), que é usado para representar o filtro eletromagnético de sequência zero, fazendo as ligações do tipo zig-zague entre seus 12 terminais.

Figura 13 - Fonte Trifásica



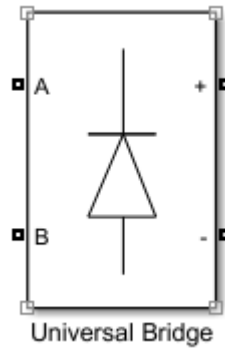
Fonte: Modificado do Simulink

Figura 14 - Ramos RLC paralelo/série



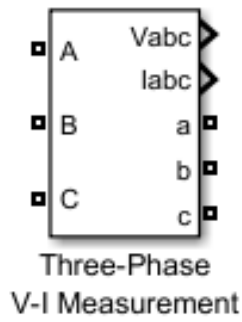
Fonte: Modificado do Simulink

Figura 15 - Ponte Retificadora Universal



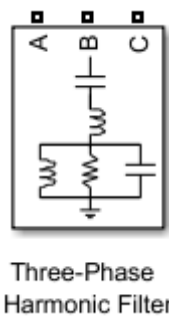
Fonte: Modificado do Simulink

Figura 16 - Barramento Trifásico



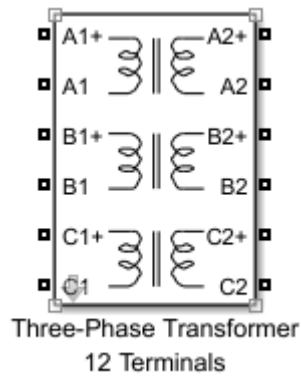
Fonte: Modificado do Simulink

Figura 17 - Filtro Passivo tipo-C Trifásico



Fonte: Modificado do Simulink

Figura 18 - Filtro Eletromagnético



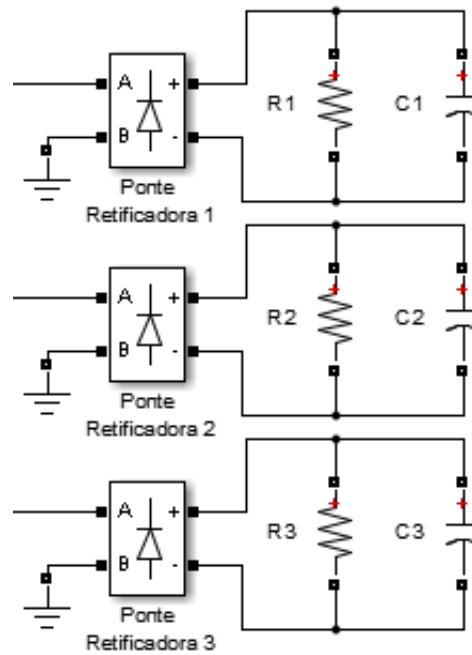
Fonte: Modificado do Simulink

### 3.3 Carga equilibrada

Para analisar a performance do filtro passivo sintonizado em terceira harmônica e o filtro eletromagnético de sequência zero há a necessidade de termos um sistema com cargas não lineares geradoras de correntes harmônicas, principalmente de terceira ordem. Como é de conhecimento no sistema elétrico são encontradas cargas equilibradas e cargas desequilibradas. A fim de contrapor o desempenho dos filtros em relação ao tipo da carga serão realizados dois tipos de simulações, uma para carga equilibrada e outra para cargas desequilibradas.

Desta forma foi escolhido cargas que possuem retificadores monofásicos, pois é de conhecimento que espectro harmônico de corrente da rede de alimentação de retificadores não-controlados é formado pela componente fundamental da corrente e pelas componentes harmônicas de ordens  $kn \pm 1$  ( $p/ k=1,2,3\dots$ ) onde  $n$  é o número de pulsos. O retificador monofásico de onda completa possui apenas dois pulsos, gerando assim, em sua essência, corrente fundamental e corrente harmônica de terceira ordem. A Figura 19 representa a carga descrita.

Figura 19 - Carga trifásica não-linear



Fonte: Os Autores

Neste primeiro momento serão mostrados uma carga equilibrada e o desempenho dos filtros para esta carga.

O sistema de alimentação foi constituído por uma fonte trifásica de 380V fase/fase. Para a definição da carga equilibrada a ser ligada aos retificadores monofásicos foi realizado inúmeras simulações, que tiveram o intuito de encontrar os valores de resistência e capacitância que gerassem a maior porcentagem de corrente harmônica de terceira ordem. A Tabela 3 traz os melhores resultados obtidos a partir destas simulações.

Tabela 3 - Simulações dos retificadores monofásicos

Retificador monofásico - Verificação de corrente fundamental e terceira harmônica em valor de pico				
Situação	Resistor ( $\Omega$ )	Capacitor ( $\mu\text{F}$ )	I_FND (A)	I_h3 (A)
A	8,5	1000	52,02	33,89
B	10	1000	45,76	31,65
C	12,5	1000	38,22	28,25
<b>D</b>	<b>8,5</b>	<b>4700</b>	<b>59,88</b>	<b>45,60</b>
E	10,0	4700	47,58	39,74
F	12,5	4700	41,04	33,40

Fonte: Os Autores

A partir da Tabela 3 pode-se verificar que a melhor opção para a carga equilibrada é a situação D, que possui uma maior geração de correntes harmônicas de terceira ordem, onde tem-se uma resistência de  $8,5 \Omega$  e uma capacitância de  $4700\mu\text{F}$  em todas as fases do sistemas. Para esta situação o valor eficaz da corrente fundamental é  $41,99 \text{ A}$  para cada fase. Com este valor tem-se um valor eficaz total da corrente de  $56,78 \text{ A}$ , assim, para a situação D, a potência do circuito é de  $37,37 \text{ kVA}$ .

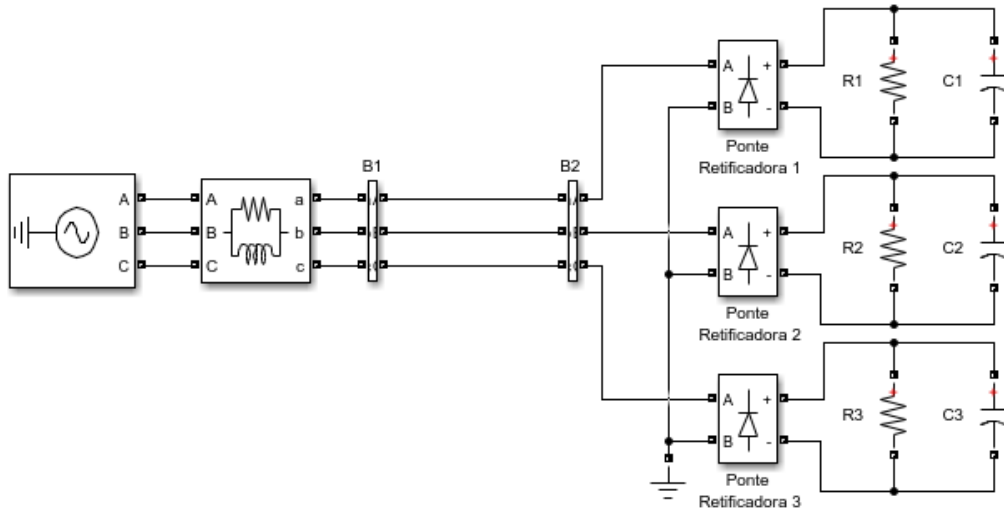
Os subtítulos a seguir tem como objetivo analisar o comportamento do circuito como um todo antes e após a inclusão de ambos os filtros, tanto o passivo sintonizado na terceira harmônica, como o filtro eletromagnético de sequência zero. Por fim, no Capítulo 4 demonstra-se a validade dos modelos matemáticos para ambos os filtros e também qual deles possui maior eficiência quanto a questão da filtragem do nível de terceira harmônica presente da corrente advinda da fonte.

### 3.4 Caso equilibrado – situação antes da conexão dos filtros

A Figura 20 representa o modelo para carga equilibrada não-linear citado em 3.3, onde a impedância de linha paralelo constitui de um resistor de  $0,1424 \Omega$  e um indutor de  $40,397 \mu\text{H}$ .

Esta situação representa um caso real do sistema elétrico, tal como: cargas não-lineares equilibradas, tensões de alimentação desequilibradas ou com distorção harmônica representado por uma simulação feita através do *Simulink*, como já foi supracitado no item 3.2.

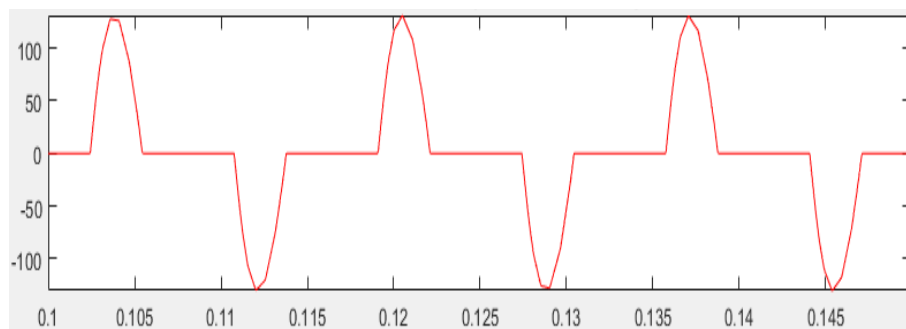
Figura 20 - Sistema para carga não-linear equilibrada



Fonte: Os Autores

A Figura 21 representa o gráfico da corrente da fase A, contido de 3 (três) ciclos do sinal. Para o caso de uma carga equilibrado a forma de onda das fases A, B e C serão similares, alterando somente o faseamento das mesmas, e é por isso que neste trabalho quando estiver tratando-se da situação equilibrada será representado apenas o gráfico de corrente de uma das fases. Este sinal é o mesmo para a fonte e para a carga, i. e., é o mesmo para os barramentos B1 e B2 do sistema. O valor de pico da corrente é de aproximadamente 166 A.

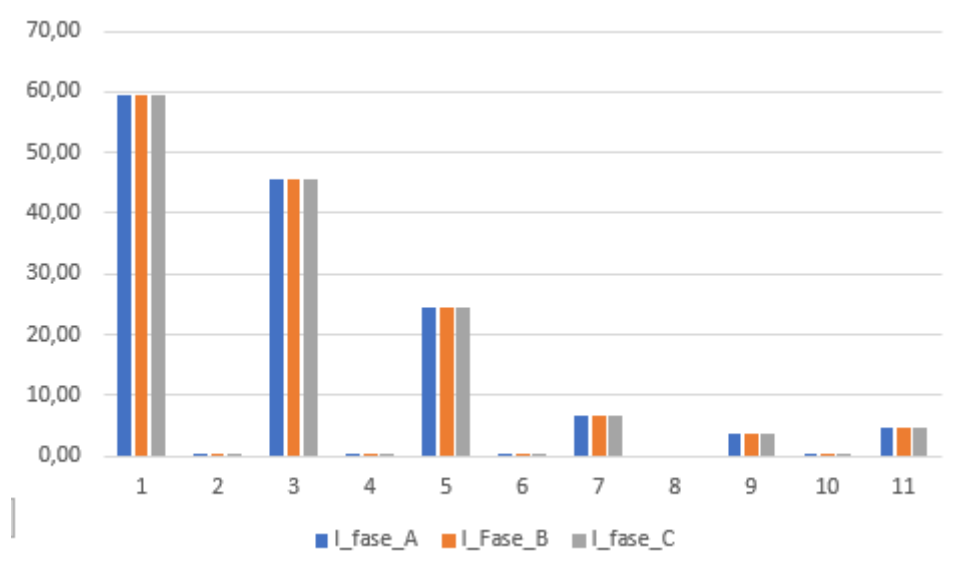
Figura 21 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase A



Fonte: Os Autores

A Figura 22 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C nos barramentos B1 e B2.

Figura 22 - Espectro harmônico de corrente nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C

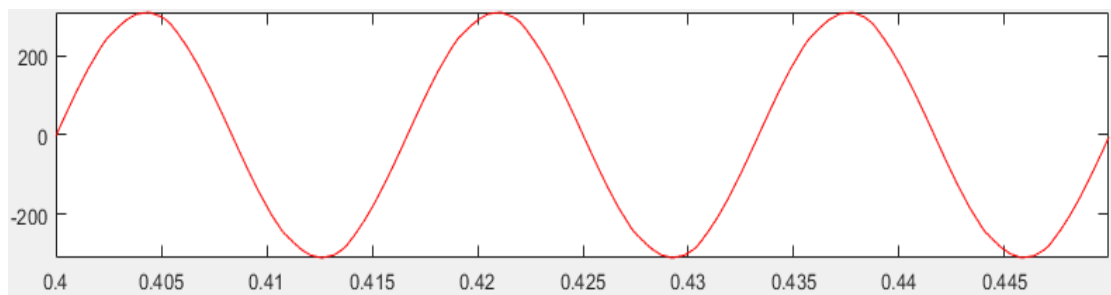


Fonte: Os Autores

Através do espectro harmônico acima, tem-se uma taxa de 76,77% de terceira harmônica com relação à fundamental, onde, este valor representa um THD de 89,01%.

A Figura 23 representa a forma de onda da tensão na fase A, como foi mencionado em 3.3, não é necessário representar as formas de onda das tensões das fases B e C, pois as mesmas serão similares a da fase A, alterando somente a fase. Para estas tensões o valor de pico é de 309,90 V.

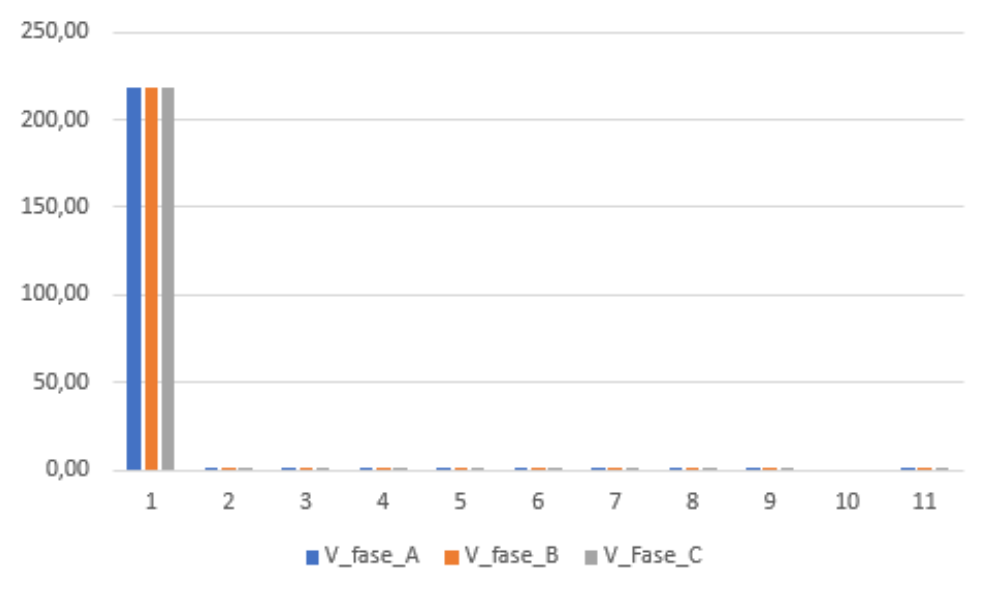
Figura 23 - Gráfico de tensão nos barramentos B1 e B2 da fase A.



Fonte: Os Autores

A Figura 24 representa o espectro harmônico de tensão para as fases A, B e C nos barramentos B1 e B2.

Figura 24 - Espectro harmônico de tensão nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C



Fonte: Os Autores

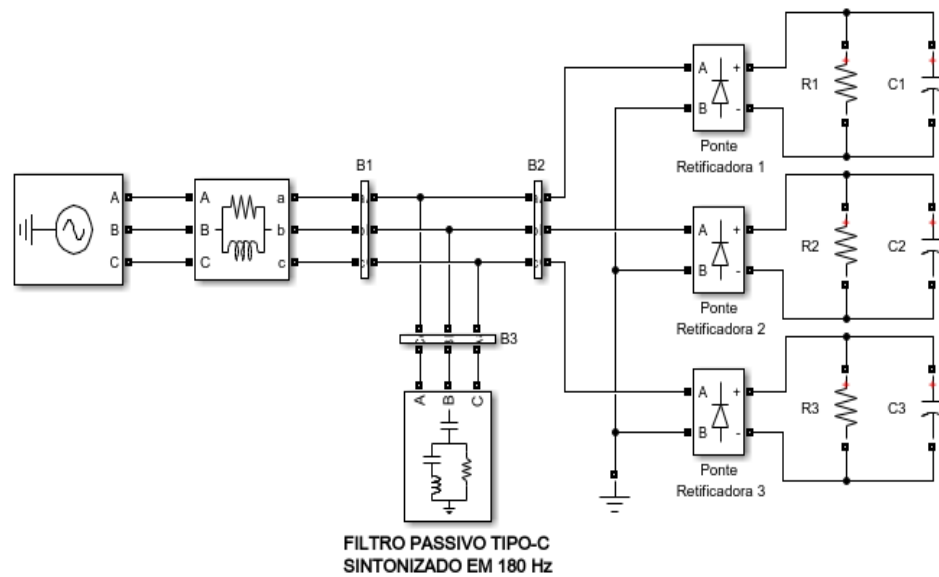
Pode-se observar que o espectro harmônico de tensão possui baixa distorção harmônica, tendo um THD de 0,88%. O valor “rms” desta tensão é de 218,85 V.

#### 3.4.1 Situação após conexão do filtro passivo sintonizado na terceira harmônica

Diante do sistema apresentado acima, onde tem-se um nível significativo de terceira harmônica nos barramentos B1 (fonte) e B2 (carga), há a necessidade de implementar-se filtros capazes de reduzir este nível, a fim de reduzir o THD de corrente no barramento B1. Assim, neste primeiro instante, fara-se uso da modelagem do filtro passivo tipo C sintonizado, no caso, na frequência de 180 Hz.

Portanto, o sistema ficará da forma da Figura 25 a seguir.

Figura 25 - Sistema com filtro passivo tipo-C conectado em paralelo



Fonte: Os Autores

Os parâmetros de entrada que se necessita colocar dentro do bloco do filtro (Figura 17) são eles: o fator de qualidade ( $Q$ ) e a potência nominal reativa do filtro (em kvar). Partindo destes dois valores, foram realizadas simulações, a fim de procurar os melhores valores de  $Q$  e [kvar] para solucionar o nosso problema de qualidade de energia, em questão, qual seja, o nível de terceira harmônica da corrente.

Entretanto, para o caso em estudo, utiliza-se um fator de qualidade dentro dos limites de 30 a 80. Já o valor do tamanho do filtro, ou seja, da potência reativa do mesmo, considera-se uma faixa entre 10% e 40% da potência da carga, que representa valores de 5 a 15 kvar.

Assim, a partir da Tabela 4 a seguir, tem-se os melhores resultados obtidos a partir dos valores de  $Q$  e potência supracitados, que demonstram valores da corrente da fonte e do filtro em seus valores fundamentais e de terceira ordem.

Tabela 4 - Valores de corrente em fundamental e 3ª harmônica nos barramentos B1 e B3 após o acréscimo do filtro passivo – carga equilibrada

Situação	Q	Potência (kvar)	I_B1_FND (A)	I_B3_FND (A)	I_B1_3H (A)	I_B3_3H (A)
1	30	5	60,68	10,72	42,64	6,54
2	30	10	64,55	21,44	39,91	12,29
3	30	15	69,97	32,18	37,07	17,12
4	50	5	61,64	10,74	39,72	9,59
5	50	10	65,49	21,5	33,66	22,05
6	50	15	70,89	32,28	27,98	28,2
7	80	5	61,55	10,75	36,73	18,7
<b>8</b>	<b>80</b>	<b>10</b>	<b>65,63</b>	<b>21,52</b>	<b>28,13</b>	<b>21,95</b>
9	80	15	71,02	32,26	22,80	26,15

fonte: Os Autores

Onde:

I\_B1\_FND – Amplitude da corrente fundamental no barramento B1;

I\_B3\_FND – Amplitude da corrente fundamental no barramento B3;

I\_B1\_3H – Amplitude da corrente de terceira harmônica no barramento B1;

I\_B3\_3H – Amplitude da corrente de terceira harmônica no barramento B3.

Observando a Tabela 4, percebe-se que, para qualquer configuração do filtro passivo, a corrente fundamental do sistema (I\_B1\_FND), ou seja, a corrente da fonte (barramento B1), irá ter um aumento em sua amplitude, tendo em vista que, quanto maior a potência reativa do filtro, maior será o módulo da corrente advinda da fonte. Também, pode-se observar que, quanto maior a potência do filtro, maior o nível de filtragem do mesmo. Assim, existe a necessidade de correlacionar estes dois fatores: potência do filtro e o nível de corrente fundamental da fonte após a filtragem. A partir disso, procura-se um valor de potência que se adeque ao fato de que não se deve aumentar consideravelmente a magnitude da corrente original (56,78 A).

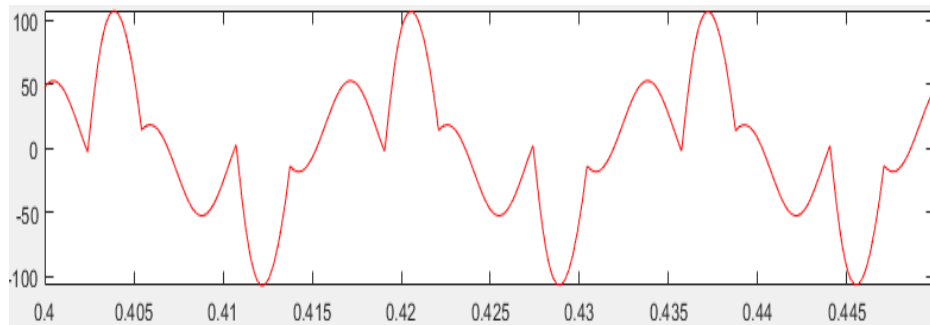
Sobre o fator de qualidade, Q, viu-se que de acordo com a faixa de valores de 30 a 80, quanto maior o seu valor, maior será a filtragem de terceira harmônica, ou seja, maior nível da corrente de terceira harmônica (I\_B3\_3H) irá circular no filtro.

Portanto, os valores de potência e fator de qualidade escolhidos que se adequem ao explicado acima, são, respectivamente, de 10 kvar e 80, ou seja, situação 8.

A seguir, são mostradas, através das Figuras 26, 27, 28 e 29, as formas de onda nos barramentos B1 e B3 e seus respectivos espectros harmônicos. É importante frisar que a forma

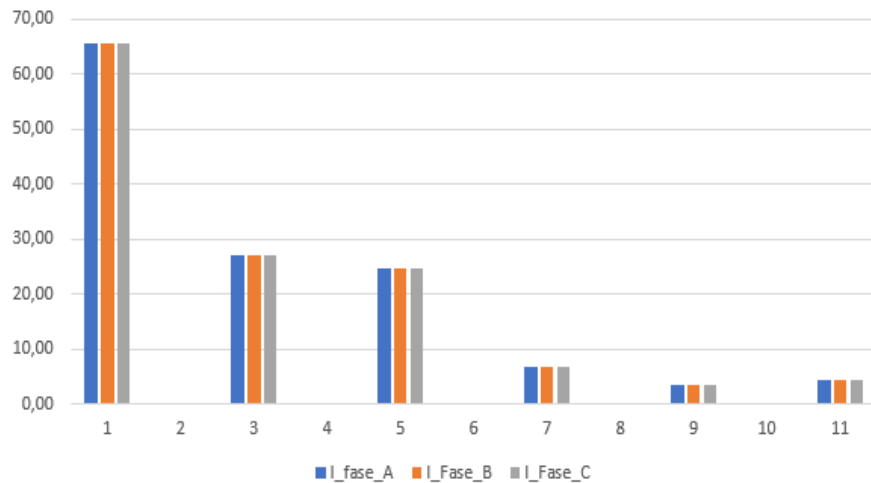
de onda e o espectro harmônico no barramento B2 não irá se alterar, independentemente da situação e, vale ressaltar também, que tomou-se um intervalo no qual a onda está em regime permanente, a partir de 0,4s, que vai até 0,5s que é o tempo de simulação. Vale ressaltar que somente as formas de ondas das três fases são semelhantes, ou seja, há um defasamento angular entre as fases, que não é demonstrado nos gráficos deste caso equilibrado.

Figura 26 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada



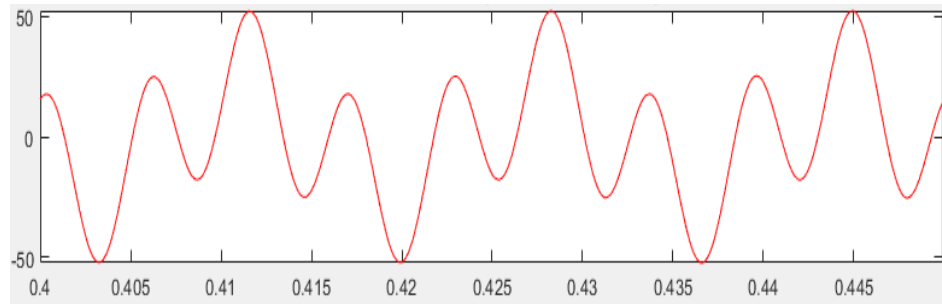
Fonte: Os Autores

Figura 27 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada



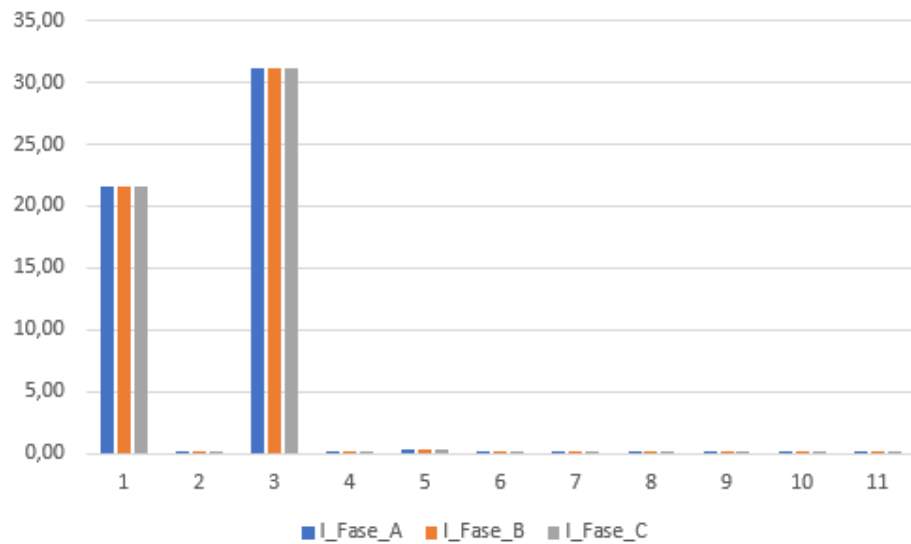
Fonte: Os Autores

Figura 28 -Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada



Fonte: Os Autores

Figura 29 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga equilibrada

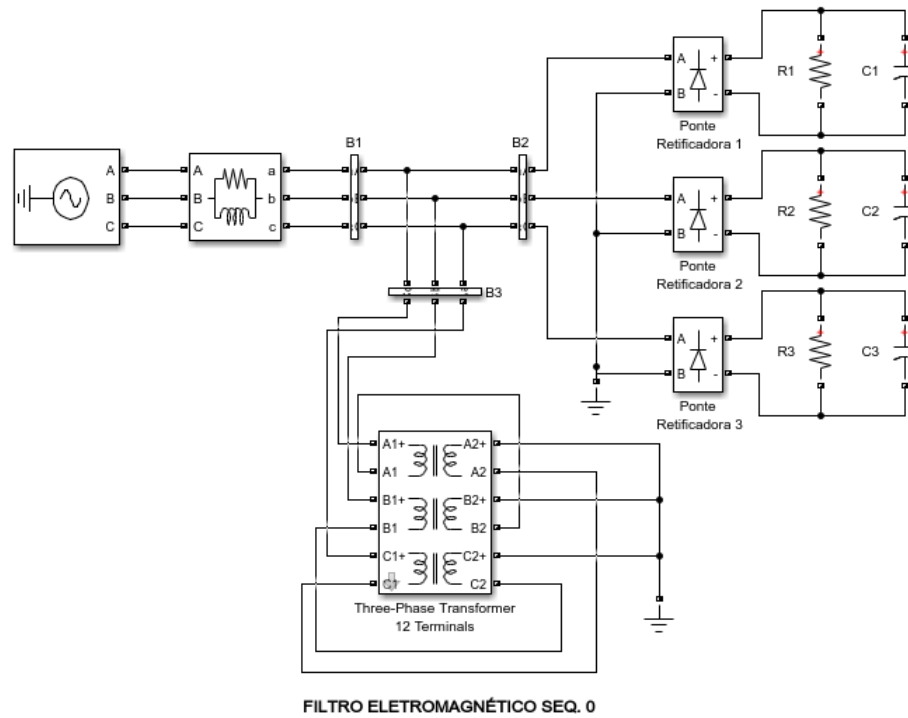


Fonte: Os Autores

### 3.4.2 Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero

A próxima forma de mitigar a filtragem de terceira harmônica presente na corrente do sistema, é através do filtro eletromagnético de sequência zero, como demonstrado em 2.7. Neste, para o mesmo caso da carga equilibrada acima, utiliza-se do bloco representado pela Figura 18. A Figura 30 mostra o filtro eletromagnético ligado ao sistema.

Figura 30 - Sistema com filtro eletromagnético de sequência zero conectado em paralelo

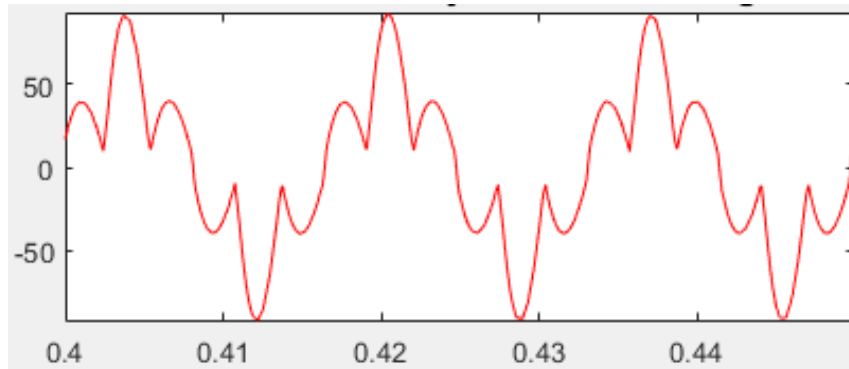


Fonte: Os Autores

Assim como demonstrado para o filtro passivo em 3.4.1, os parâmetros de entrada que deve-se colocar dentro do bloco denominado como “FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQ. 0” são, neste caso particular, pré-estabelecidos, retirados da tese de [5].

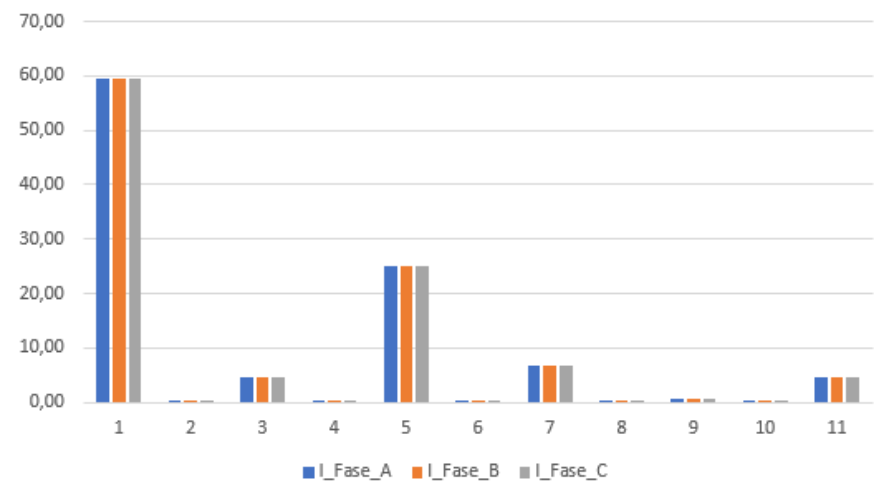
A seguir, são mostradas, através das Figuras 31, 32, 33 e 34, as formas de onda nos barramentos B1 e B3 e seus respectivos espectros harmônicos. Portanto, tem-se, a seguir, as formas de onda nestes barramentos e seus respectivos espectros harmônicos.

Figura 31 - Gráfico de corrente no barramento B1 das fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada



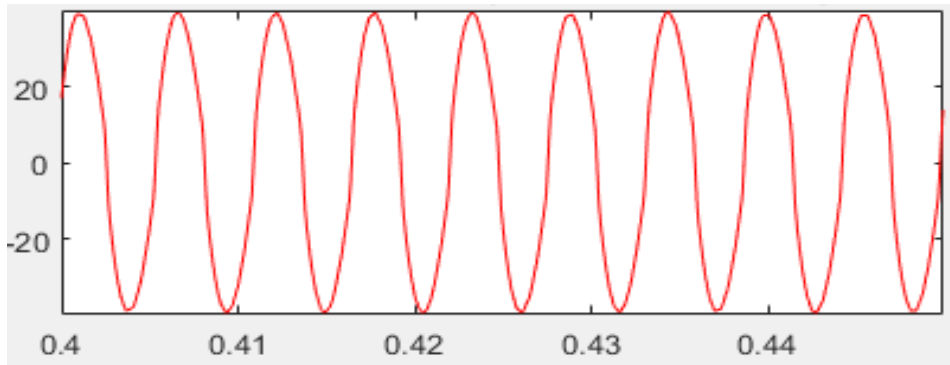
Fonte: Os Autores

Figura 32 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada



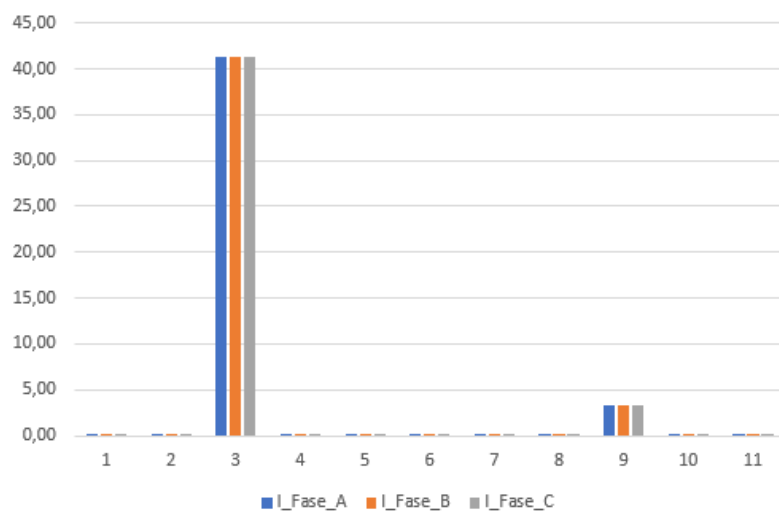
Fonte: Os Autores

Figura 33 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada



Fonte: Os Autores

Figura 34 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga equilibrada



Fonte: Os Autores

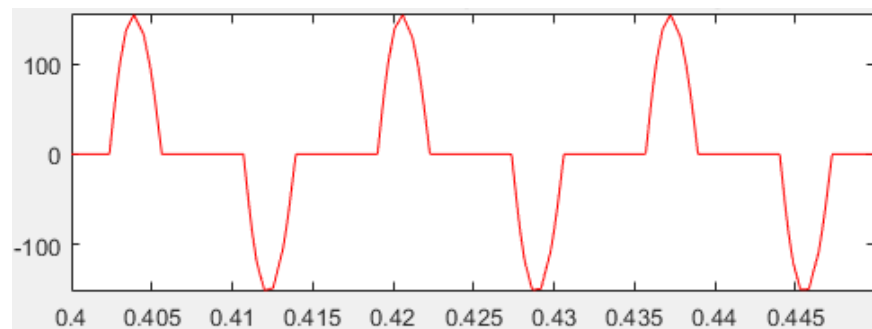
### 3.5 Caso desequilibrado – situação antes da conexão dos filtros

Como foi citado em 3.3 também foi simulado a utilização do filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético de sequência zero para carga não lineares e desequilibradas. Para este caso, tem-se o mesmo sistema presente em 3.4.1, Figura 25. Porém, agora, os valores dos resistores e dos capacitores, não são os mesmos, tendo assim um sistema desequilibrado. Como o único objetivo desta carga é ter valores de correntes diferentes para cada fase, não foi necessário analisar quais cargas produziram maiores distorções harmônicas em cada fase, foi

apenas levado em consideração as formas de ondas diferentes, com isso tem-se os seguintes valores para os resistores  $R1 = 6,5 \Omega$ ,  $R2 = 8,5 \Omega$ ,  $R3 = 10,5 \Omega$  e para as capacitâncias tem-se que  $C1 = 6700 \mu\text{F}$ ,  $C2 = 4700 \mu\text{F}$  e  $C3 = 700 \mu\text{F}$ .

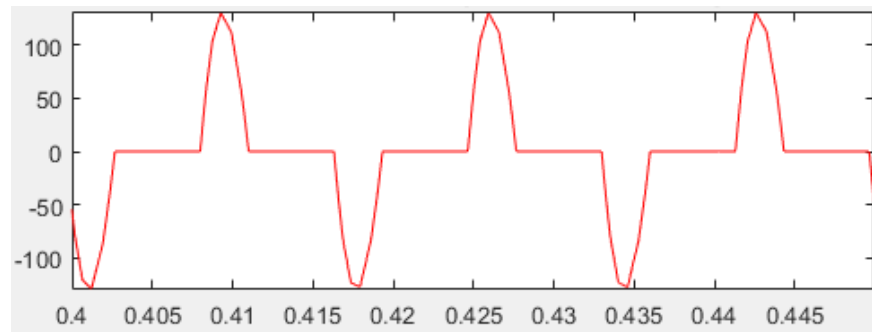
Sendo que as Figuras 35, 36 e 37, representam a forma de ondas das fases A, B e C, respectivamente, nas cargas não lineares desequilibradas.

Figura 35 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase A – carga desequilibrada



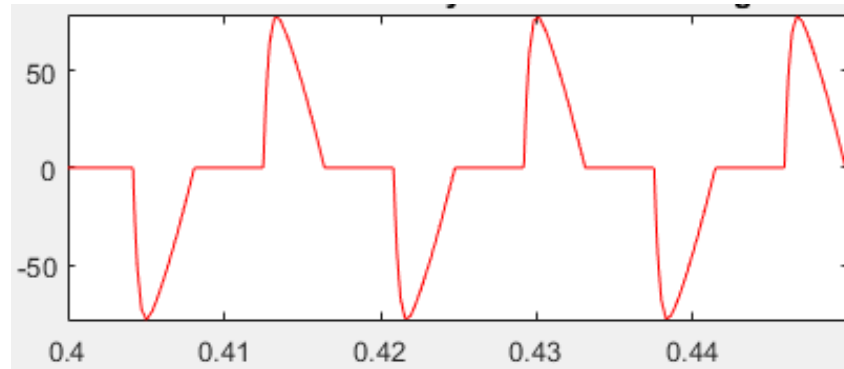
Fonte: Os Autores

Figura 36 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase B – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

Figura 37 - Gráfico de corrente nos barramentos B1 e B2 da fase C – carga desequilibrada

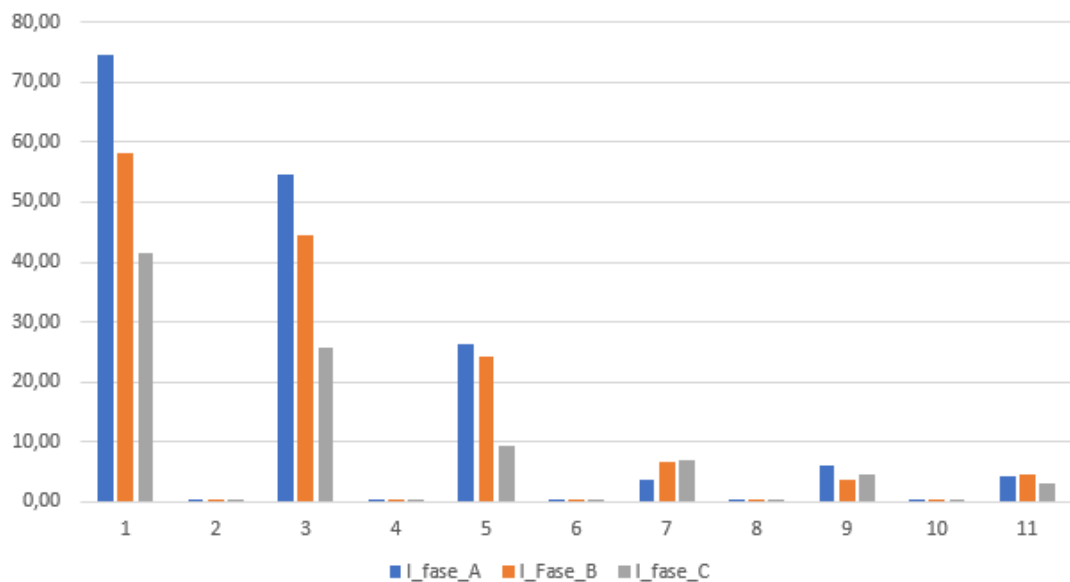


Fonte: Os Autores

Sendo que, para este caso, o módulo das correntes fundamentais das fases A, B e C, respectivamente, são iguais a 74,95 A, 58,43 A, 48,67 A.

A Figura 38 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C nos barramentos B1 e B2, para o caso de carga desequilibrada.

Figura 38 - Espectro harmônico de corrente nos barramentos B1 e B2 das fases A, B e C – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

A taxa de terceira harmônica presente nas fases A, B e C, respectivamente, é de 73,34%; 76,76% e 62,09%. O THD, também respectivamente, é de 82,48%; 88,93% e 70,27%.

### 3.5.1 Situação após conexão do filtro passivo sintonizado na terceira harmônica

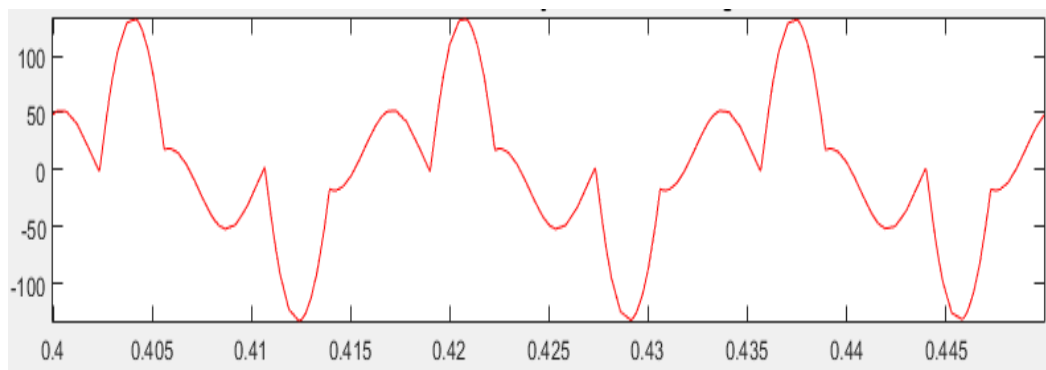
Diante do apresentado no tópico anterior, assim como em 3.4.1, utiliza-se, primeiramente, da técnica de filtragem de terceira harmônica através do filtro passivo sintonizado, em 180 Hz, mas agora para a carga desequilibrada, citada em 3.5.

Como já foi mencionado anteriormente, não há a necessidade de mostrar a forma da corrente na carga após o incremento dos filtros, pois esta não será modificada. Logo, será apresentada a forma de onda em cada fase somente nos barramentos B1 e B3, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado.

É importante ressaltar que não foi alterado os dados de entrada do filtro para uma carga desequilibrado, com isso o mesmo possui parâmetros de entrada como citado em 3.4.1.

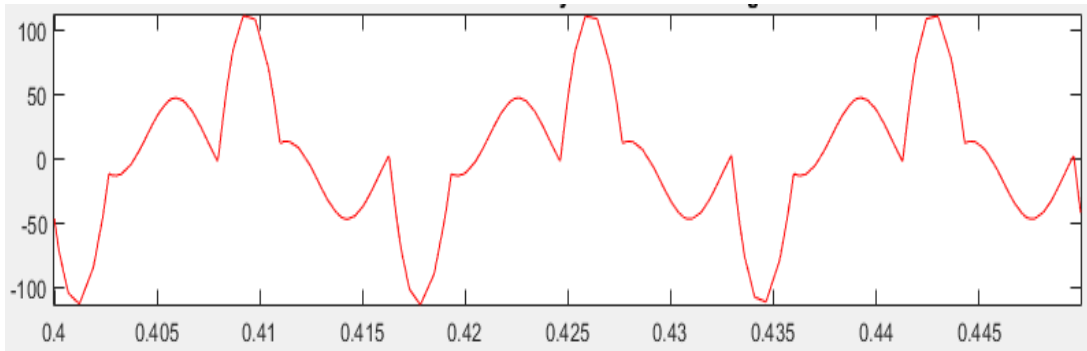
Sendo que as Figuras 39, 40 e 41, representam a forma de ondas das fases A, B e C, respectivamente, no barramento B1 após o acréscimo do filtro passivo sintonizado.

Figura 39 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



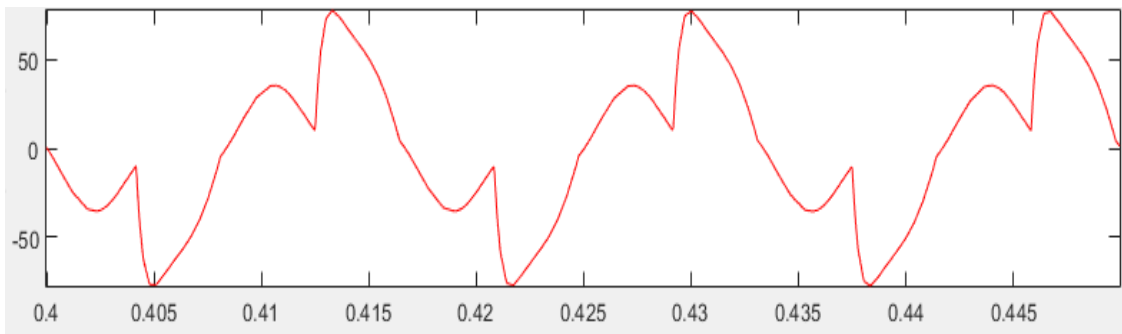
Fonte: Os Autores

Figura 40 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase B, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

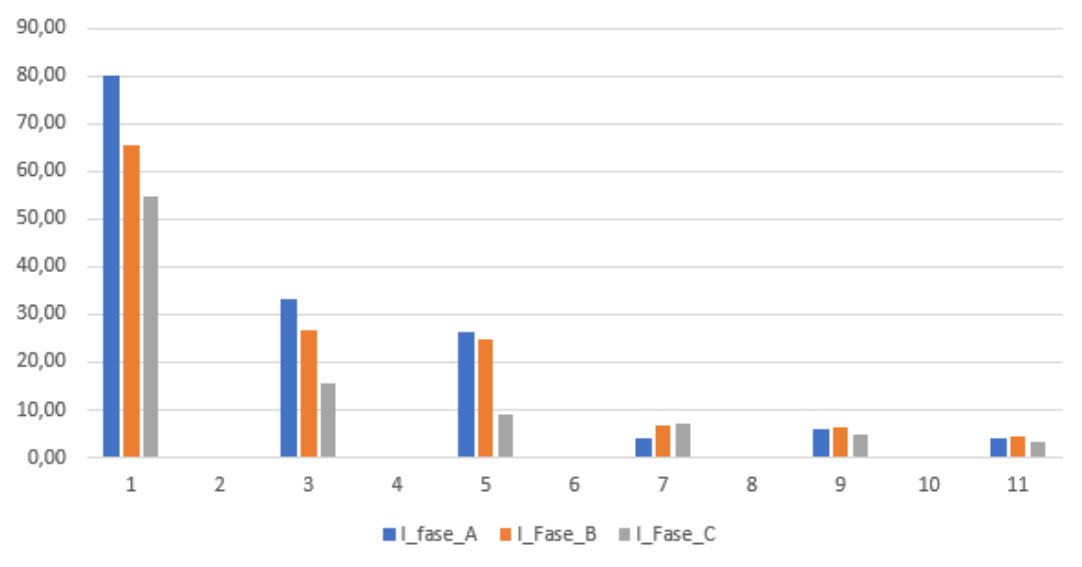
Figura 41 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

A Figura 42 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C no barramento B1, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado.

Figura 42 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

Os valores destas correntes estão na Tabela 5 abaixo.

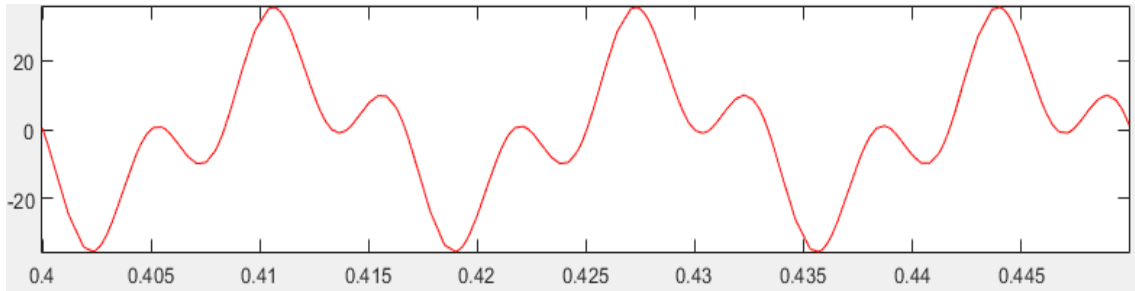
Tabela 5 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B1, após a conexão do filtro passivo – carga desequilibrada

h	I_Fase_A (A)	I_Fase_B (A)	I_Fase_C (A)
1	80,27	65,55	54,72
2	0,10	0,05	0,04
3	33,35	26,64	15,53
4	0,11	0,06	0,04
5	26,37	24,67	9,16
6	0,04	0,04	0,03
7	3,98	6,75	7,26
8	0,01	0,03	0,03
9	5,85	6,36	4,77
10	0,03	0,01	0,03
11	4,23	4,47	3,25

Fonte: Os Autores

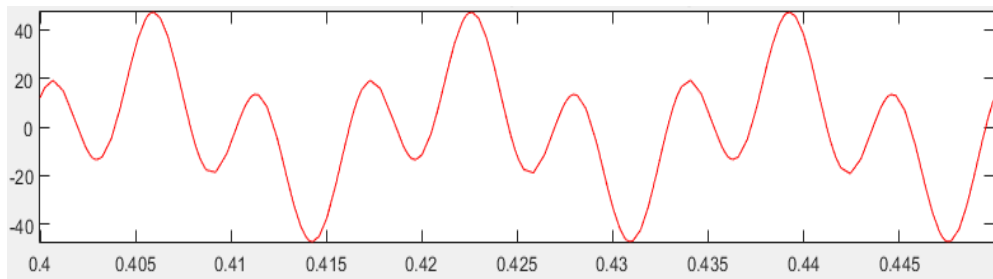
As Figuras Figura 43, Figura 44, Figura 45 representam a forma de ondas das fases A, B e C, respectivamente, no barramento B3 após o acréscimo do filtro passivo sintonizado.

Figura 43 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



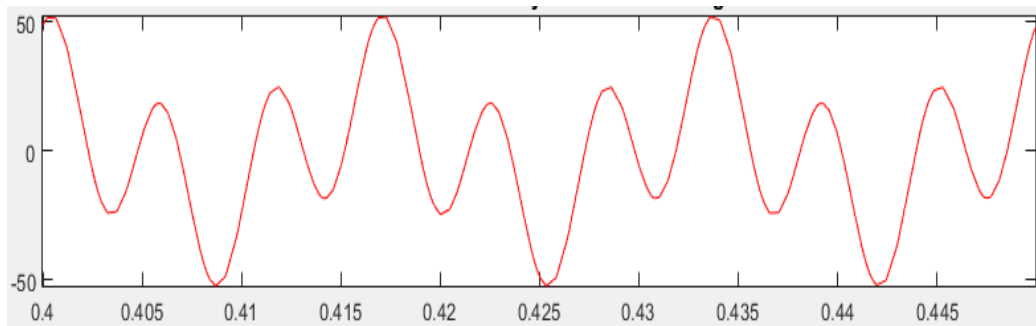
Fonte: Os Autores

Figura 44 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase B, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

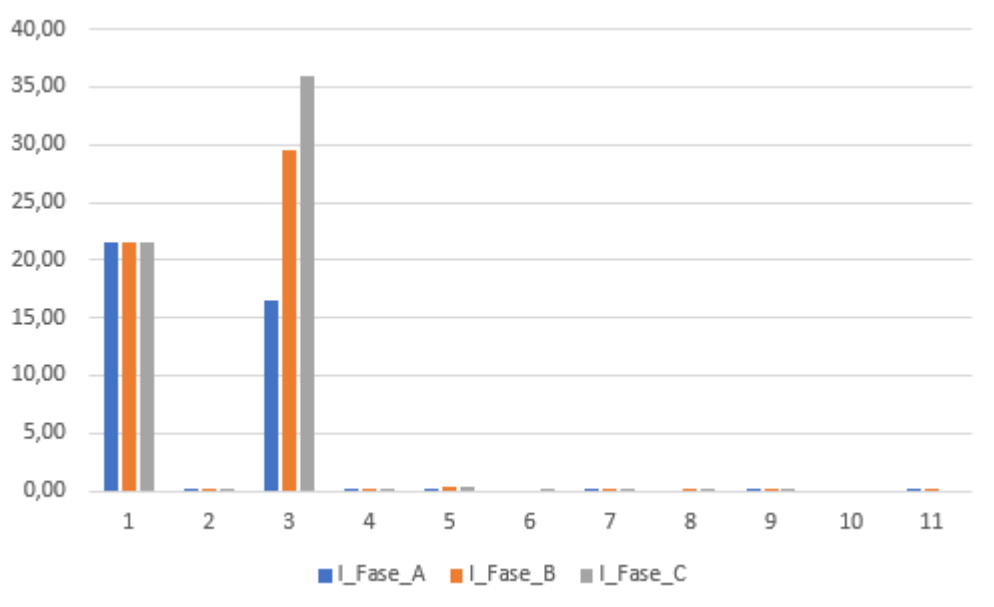
Figura 45 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

A Figura 46 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C no barramento B3, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado.

Figura 46 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro passivo sintonizado – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

O valor destas correntes está presente na Tabela 6 abaixo.

Tabela 6 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B3, após a conexão do filtro passivo – carga desequilibrada

h	I_Fase_A (A)	I_Fase_B (A)	I_Fase_C (A)
1	21,51	21,49	21,47
2	0,02	0,03	0,04
3	16,50	29,52	35,87
4	0,02	0,02	0,04
5	0,10	0,28	0,30
6	0,00	0,00	0,01
7	0,05	0,05	0,04
8	0,00	0,01	0,01
9	0,05	0,04	0,06
10	0,00	0,00	0,00
11	0,03	0,04	0,01

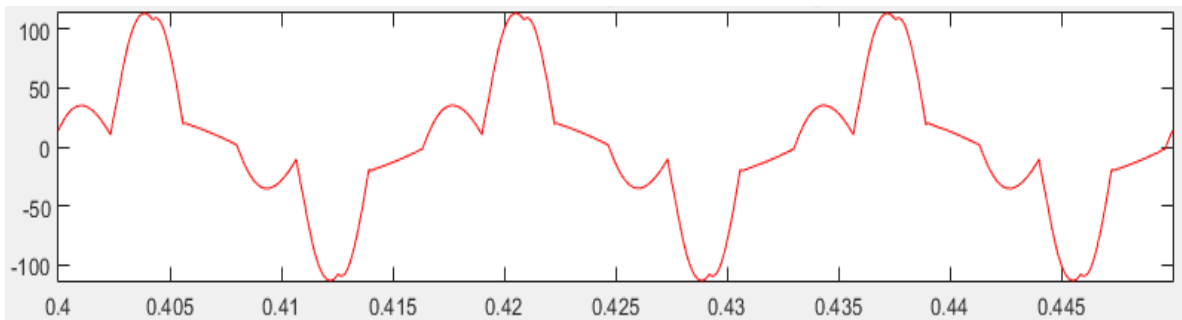
Fonte: Os Autores

### 3.5.2 Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero

Analogamente, como foi descrito e apresentado em 3.4.2, tem-se a seguir as formas de ondas e espectros harmônicos nos barramentos B1 e B3, para o filtro eletromagnético de sequência zero.

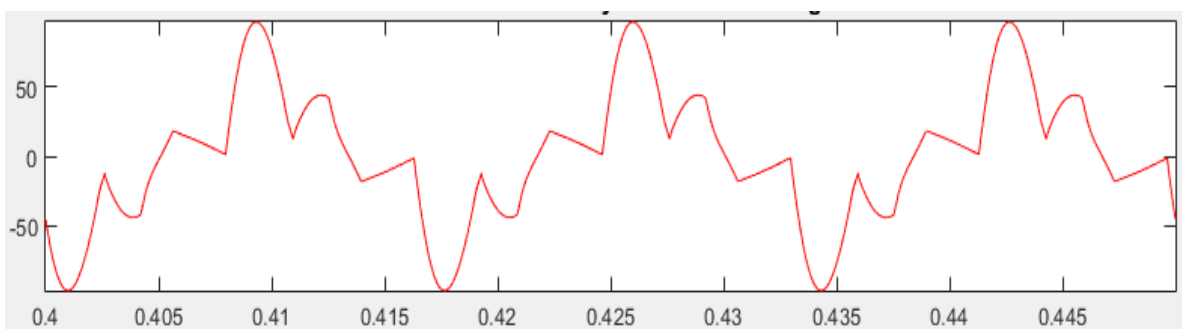
As Figuras 47, 48 e 49 representam a forma de ondas das fases A, B e C, respectivamente, no barramento B1 após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero.

Figura 47 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



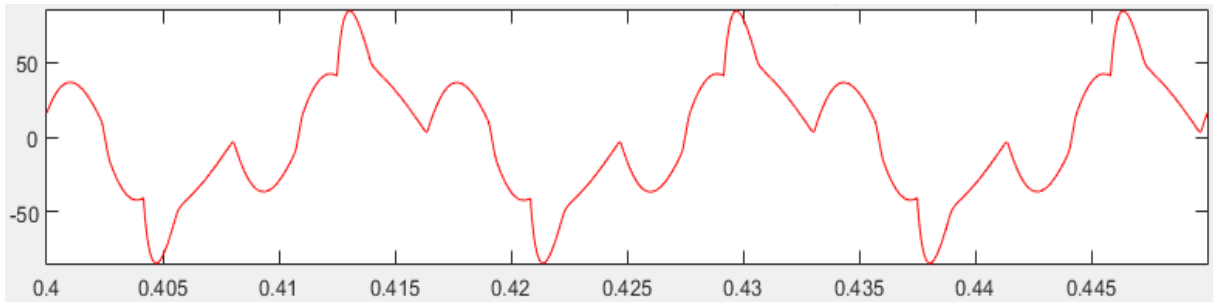
Fonte: Os Autores

Figura 48- Gráfico de corrente no barramento B1 da fase B, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

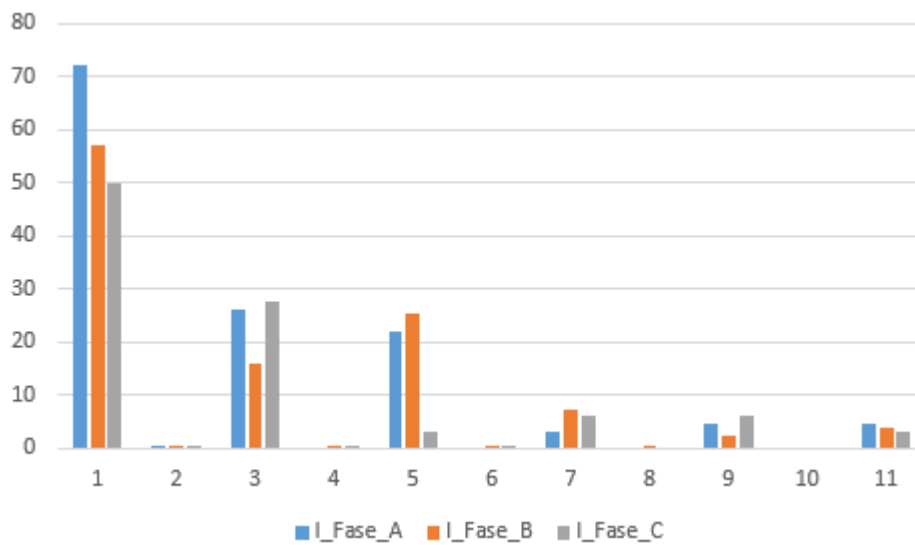
Figura 49 - Gráfico de corrente no barramento B1 da fase C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

A Figura 50 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C no barramento B1, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero.

Figura 50 - Espectro harmônico de corrente no barramento B1 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

O valor destas correntes está presente na Tabela 7 abaixo.

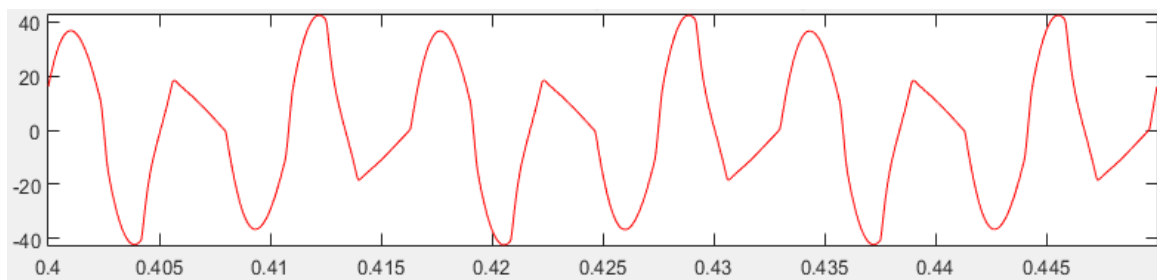
Tabela 7 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B1, após a conexão do filtro eletromagnético – carga desequilibrada

h	I_Fase_A (A)	I_Fase_B (A)	I_Fase_C (A)
1	71,32	55,44	50,20
2	0,05	0,03	0,10
3	23,43	13,19	29,10
4	0,11	0,07	0,02
5	21,62	25,11	3,48
6	0,08	0,10	3,00
7	2,72	7,27	5,60
8	0,01	0,05	0,04
9	4,52	2,33	6,30
10	0,04	0,04	0,02
11	4,77	3,46	2,78

Fonte: Os Autores

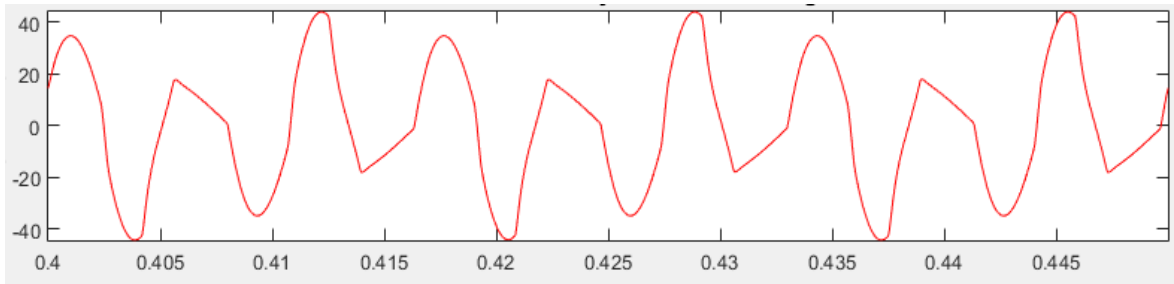
As Figuras 51, 52 e 53 representam a forma de ondas das fases A, B e C, respectivamente, no barramento B3 após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero.

Figura 51 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase A, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



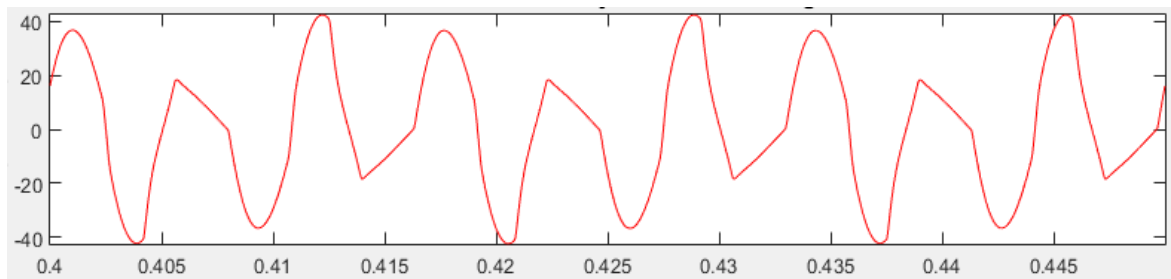
Fonte: Os Autores

Figura 52 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase B, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

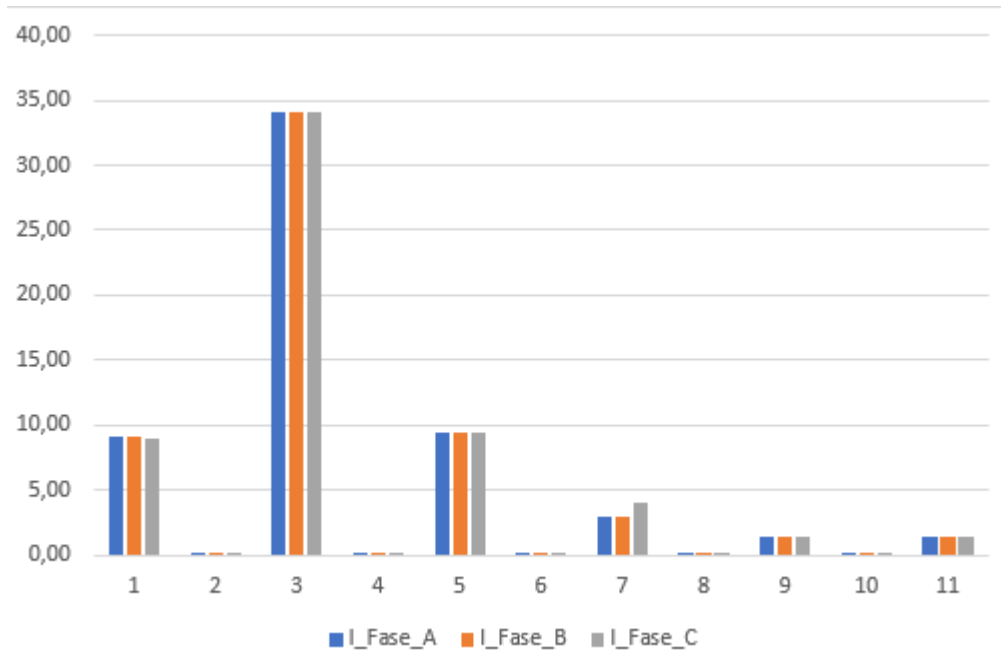
Figura 53 - Gráfico de corrente no barramento B3 da fase C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

A Figura 54 representa o espectro harmônico de corrente para as fases A, B e C no barramento B3, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero.

Figura 54 - Espectro harmônico de corrente no barramento B3 das fases A, B e C, após o acréscimo do filtro eletromagnético de sequência zero – carga desequilibrada



Fonte: Os Autores

Os valores destas correntes estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores de pico das correntes das fases A, B e C no barramento B3, após a conexão do filtro eletromagnético – carga desequilibrada

h	I_Fase_A (A)	I_Fase_B (A)	I_Fase_C (A)
1	9,14	9,11	8,94
2	0,07	0,07	0,07
3	34,14	34,14	34,14
4	0,06	0,05	0,05
5	9,48	9,48	9,48
6	0,01	0,01	0,01
7	2,98	2,98	3,98
8	0,03	0,03	0,03
9	1,37	1,37	1,37
10	0,01	0,01	0,01
11	1,42	1,42	1,42

Fonte: Os Autores

### **3.6 Considerações Finais**

Após representar ambos os sistemas, contendo também os espectros e formas de onda de corrente dos mesmos, há a necessidade de avaliar e comparar estes parâmetros, conforme consta na Seção 4.

## 4 ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS FILTROS PASSIVO SINTONIZADO E ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO

### 4.1 Considerações iniciais

Nesta Seção 4, serão avaliados o desempenho dos filtros passivo sintonizado e eletromagnético de sequência zero.

### 4.2 Conclusões do desempenho do caso equilibrado

Analisando primeiramente o desempenho dos filtros para os casos apresentados em 3.4.1 e 3.4.2, tem-se a Tabela 9, na qual apreñeta uma comparação dos valores do módulo da corrente de pico das 3 fases (A, B e C) da fundamental até a 11ª harmônica no barramento B1 (terminal da fonte), antes e depois da conexão de ambos os filtros. Somente as harmônicas de ordem ímpar são mostradas, tendo em vista que as ordens pares não apresentam valores consideráveis, conforme visto anteriormente.

Tabela 9 - Corrente de pico na situação antes e após a conexão de ambos os filtros - barramento B1 carga equilibrada

(h)	Situação antes	Situação após conexão do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica	Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero
1	59,38 A	65,52 A	59,52 A
3	45,61 A	27,02 A	4,46 A
5	24,55 A	24,71 A	25,00 A
7	6,64 A	6,74 A	6,73 A
9	3,61 A	3,57 A	0,49 A
11	4,50 A	4,50 A	4,68 A

Fonte: Os Autores

#### 4.2.1 Análise do filtro passivo sintonizado tipo-C, em 3ª harmônica

Observando a situação após a conexão do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica, viu-se que, como já citado em 2.6, tem-se um aumento da corrente fundamental do sistema, da ordem de 10,34% em relação à situação antes da conexão do filtro. Este valor é de suma importância quando se analisa o filtro ideal a se conectar a um determinado sistema elétrico, pois, é de conhecimento que quando esta corrente advinda da fonte tiver um aumento considerável em sua magnitude, gera um aumento no consumo de energia elétrica, tendo, assim, uma possível rejeição do cliente na implantação desse filtro para resolver o problema de alto índice de distorção de terceira harmônica existente.

Agora, dado o enfoque do presente trabalho na terceira harmônica do sistema, tem-se que após a conexão do filtro passivo sintonizado nesta harmônica, o mesmo filtra cerca de 59,25% da corrente de terceira harmônica que antes era produzida pela fonte, pois a diferença de antes e depois é de 18,59 A. Este resultado nos mostra que o filtro passivo tipo-C é capaz de reduzir uma quantidade considerável do nível dessa harmônica, porém, este valor poderia ser melhorado para o caso de aumento do tamanho do filtro (ou seja, sua potência), como foi estudado na Tabela 4, mas, assim, o nível de corrente fundamental iria se elevar drasticamente, impossibilitando utilizar este filtro como solução.

No caso, como o filtro está sintonizado na terceira harmônica, o mesmo não será capaz de filtrar as harmônicas de outras ordens, como a 5ª, 7ª, 9ª e 11ª. De acordo com a Tabela 9, pode-se perceber que há insignificantes variações nos níveis dessas outras harmônicas após a inclusão do filtro passivo, confirmando o que acaba de ser dito.

Assim, tem-se que Tabela 10 demonstra o nível da distorção individual da 3ª harmônica, e distorção harmônica total, nas situações antes e após a conexão do filtro, calculados a partir da equação 2-4.

Tabela 10 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro passivo - barramento B1 carga equilibrada

THD	Situação antes	Situação após conexão do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica
Total	89,91%	57,71%
Individual (3ª harmônica)	76,78%	41,25%

Fonte: Os Autores

#### 4.2.2 Análise do filtro eletromagnético de sequência zero

Observando a situação após a conexão do filtro eletromagnético de sequência zero, tem-se um aumento desconsiderável da corrente fundamental, diferentemente do caso passivo sintonizado no subtópico 4.2.1 acima. Isto é explicável, quando observa-se a Tabela 2, que mostra que, para um sistema equilibrado, a corrente fundamental é em sua essência, composta por componente de sequência positiva, sendo assim, o filtro não será capaz de filtrá-la.

Tendo em vista que, como já visto anteriormente, as harmônicas *triplens* são, essencialmente, compostas em sua totalidade por componente de sequência zero. Assim, como fundamentado em 2.7, o filtro eletromagnético de sequência zero, é visto pelo sistema como um caminho de baixa impedância de sequência zero ( $Z_0 \cong 0$ ). Sendo assim, o filtro é capaz de reduzir para 9,78% a corrente de terceira harmônica na fonte, pois a diferença de antes e depois é de 41,15 A. Este resultado demonstra que este filtro é capaz de filtrar quase toda corrente de terceira harmônica presente no sistema.

Além da 3ª harmônica, o filtro, como dito acima, filtrará as outras harmônicas múltiplas da 3ª (*triplens*), como é o caso da 9ª harmônica. Neste caso, tem-se uma redução do nível desta harmônica de cerca de 86,42%.

A Tabela 11 ilustra o nível da distorção individual da 3ª harmônica, e distorção harmônica total, nas situações antes e após a conexão do filtro, calculados a partir da equação 2-4.

Tabela 11 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro eletromagnético - barramento B1 carga equilibrada

THD	Situação antes	Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero
Total	89,91%	45,13%
Individual (3ª harmônica)	76,78%	7,54%

Fonte: Os Autores

#### 4.2.3 Comparação entre o filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético

Em resumo, comparando a variação da corrente fundamental após a conexão de ambos os filtros, percebe-se que a inserção do filtro eletromagnético não provoca um aumento relevante no valor desta corrente, diferentemente do caso onde se coloca o filtro passivo. Por isso, nesse ponto, o filtro eletromagnético tem um melhor desempenho.

Partindo para a filtragem de terceira harmônica, observa-se que o filtro eletromagnético também é o mais indicado, pois, o nível de filtragem do mesmo é maior que o dobro do nível de filtragem do filtro passivo. Assim, também nesse ponto, o filtro eletromagnético tem um melhor desempenho.

A Tabela 12 mostra a eficiência dos dois filtros, que foi calculada pela diferença da corrente antes da conexão dos filtros e após a conexão.

Tabela 12 - Eficiência em relação ao nível de filtragem dos filtros – carga equilibrada

Dados	Eficiência do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica	Eficiência do filtro eletromagnético de sequência zero
Corrente de 3ª harmônica	40,76%	90,22%

Fonte: Os Autores

Logo, conclui-se que, em geral, levando em consideração todos aspectos levantados nos parágrafos acima: distorção harmônica total e individual, e eficiência na filtragem de terceira harmônica; o filtro eletromagnético de sequência zero é a melhor escolha para filtragem de correntes de 3ª harmônica, no caso do sistema em estudo ser equilibrado.

### 4.3 Conclusões do desempenho do caso desequilibrado

Agora, analisando o desempenho dos filtros para os casos presentes em 3.5.1 e 3.5.2, i.e., cargas desequilibradas, tem-se a Tabela 13 na qual há uma comparação, que diferentemente da situação apresentada em 4.2, existe uma diferença de valores entre as 3 fases (A, B e C), das correntes de pico da fundamental até a 11ª harmônica no barramento B1, antes e depois da conexão de ambos os filtros.

Tabela 13 - Corrente de pico na situação antes e após a conexão de ambos os filtros - barramento B1 carga desequilibrada

h	Situação antes			Situação após conexão do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica			Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	74,45 A	58,08 A	41,36 A	80,27 A	65,55 A	54,72 A	71,32 A	55,44 A	50,2 A
3	54,6 A	44,58 A	25,68 A	33,35 A	26,64 A	15,53 A	23,43 A	13,19 A	29,1 A
5	26,2 A	24,33 A	9,27 A	26,37 A	24,67 A	9,16 A	21,62 A	25,11 A	3,48 A
7	3,71 A	6,56 A	7,07 A	3,98 A	6,75 A	7,26 A	2,72 A	7,27 A	5,60 A
9	6,08 A	3,62 A	4,69 A	5,85 A	6,358 A	4,77 A	4,52 A	2,33 A	6,30 A
11	4,37 A	4,45 A	3,10 A	4,23 A	4,47 A	3,25 A	4,77 A	3,46 A	2,78 A

Fonte: Os Autores

#### 4.3.1 Análise do filtro passivo sintonizado tipo-C, em 3ª harmônica

Fazendo a mesma análise do caso 4.2, tem-se que o sistema desequilibrado apresenta uma variação da corrente fundamental de 7,82%, 12,86% e 32,30% das fases A, B e C, respectivamente. Como o filtro passivo é trifásico, e não foi alterado os valores de projeto do mesmo para os dois casos, ou seja, ele possui os mesmos parâmetros do caso equilibrado, tem-se que na Fase C a nossa carga possui potência consideravelmente menor quando comparado à Fase B, que é a referência, pois possui os mesmos valores do caso equilibrado. Assim, há um desnível no aumento da corrente fundamental nesta fase, porque o filtro não foi projetado para uma carga com potência menor que 37,37 kVA. Portanto, percebe-se que o filtro trifásico passivo tipo-C sintonizado é extremamente sensível a variações de potência da carga.

Observando a magnitude de 3ª harmônica, tem-se que após a conexão do filtro, ele é capaz de filtrar cerca de 38,92%, 40,24% e 39,52% da corrente de terceira harmônica, das fases A, B e C, respectivamente. Assim, pode-se concluir que, para o caso desequilibrado em questão, o filtro passivo apresenta desempenho semelhante, para as três fases, como o filtro passivo para o caso equilibrado, 4.2 acima. Ele também está sintonizado na terceira harmônica, logo, não é capaz de filtrar harmônicas de outras ordens, como está notável na Tabela 14.

A tabela 14 mostra a distorção harmônica individual de 3ª harmônica e a distorção harmônica total.

Tabela 14 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro passivo - barramento B1 carga desequilibrada

THD	Situação antes			Situação após conexão do filtro passivo sintonizado em 3ª harmônica		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Total	82,30%	88,29%	70,05%	54,14%	57,22%	38,00%
Individual (3ª harmônica)	73,37%	76,78%	61,66%	41,55%	40,64%	28,56%

Fonte: Os Autores

#### 4.3.2 Análise do filtro eletromagnético de sequência zero

Como visto na Tabela 1, para sistema desequilibrados, entende-se que cada ordem harmônica será constituída por todas componentes de sequência: positiva, negativa e zero. Porém, cada ordem harmônica será composta pela sua componente de sequência natural, ou seja, originalmente pensando em um sistema equilibrado, como mostra a Tabela 2. Assim, por exemplo, as *triplens*, no caso desequilibrado, são constituídas em sua maioria por componente de sequência negativa, mas, agora, ela possui uma parte considerável de corrente de sequência negativa e positiva. Então, nesse caso, o filtro será capaz de filtrar também a componente zero de todas as ordens harmônicas presentes no sistema.

A corrente fundamental após a conexão do filtro, tem um comportamento diferente comparado ao caso analisado em 4.2.2, onde pôde ser desconsiderado o aumento do nível desta corrente. Agora, ainda que o aumento dessa corrente, em algumas fases, seja relativamente pequeno, não é possível dizer que o mesmo possa ser desconsiderado. Este fato é totalmente

plausível, pois agora, a corrente fundamental é composta, além da sequência positiva, em parte negativa e zero.

A redução de terceira harmônica, neste caso, é cerca de 57,09% para a Fase A; 70,41% para a Fase B e na Fase C, há um aumento de 13,32% devido à característica do filtro eletromagnético, para o caso desequilibrado, equilibrar as fases.

A Tabela 15 apresenta o nível antes e depois da distorção harmônica individual da 3ª harmônica, e também da distorção harmônica total.

Tabela 15 - THD Total e Individual da terceira harmônica nas situações antes e após a conexão do filtro eletromagnético - barramento B1 carga desequilibrada

THD	Situação antes			Situação após conexão do filtro eletromagnético de sequência zero		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Total	82,30%	88,29%	70,05%	45,91%	55,44%	61,36%
Individual (3ª harmônica)	73,37%	76,78%	61,66%	23,43%	13,19%	29,10%

Fonte: Os Autores

#### 4.3.3 Comparação entre o filtro passivo sintonizado e o filtro eletromagnético

Pode-se concluir, observando a corrente fundamental, quase que analogamente a situação de carga equilibrada, que o filtro eletromagnético de sequência zero quase não altera o valor, em média, da corrente fundamental da fonte. Já o filtro passivo, em média, tem-se um crescimento considerável. Assim, considerando este fator importante, o filtro eletromagnético tem um melhor desempenho.

A Tabela 16 a seguir, apresenta a eficiência dos dois filtros, que foi calculada pela diferença da corrente antes da conexão dos filtros e após a conexão.

Tabela 16 - Eficiência em relação ao nível de filtragem dos filtros – carga desequilibrada

Dados	Eficiência do filtro passivo sintonizado em 3 <sup>a</sup> harmônica			Eficiência do filtro eletromagnético de sequência zero		
	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
Corrente de 3 <sup>a</sup> harmônica	38,92%	40,24%	39,52%	57,09%	70,41%	-13,32%

Fonte: Os Autores

Observando-se a questão da filtragem do nível de terceira harmônica, percebe-se que para as fases A e B, o filtro eletromagnético possui melhor desempenho de acordo com a Tabela 16. Já a fase C, pelo contrário, o filtro passivo sintonizado possui melhor desempenho. Portanto, para analisar melhor o desempenho total, tem-se a necessidade de vasculhar a média dessas eficiências, haja vista a Tabela 17 abaixo.

Tabela 17 – Média da eficiência da filtragem dos filtros – carga desequilibrada

Dados	Eficiência do filtro passivo sintonizado em 3 <sup>a</sup> harmônica	Eficiência do filtro eletromagnético de sequência zero
Corrente de 3 <sup>a</sup> harmônica	39,56%	38,06%

Fonte: Os Autores

Logo, conclui-se que, em geral, levando em consideração todos aspectos levantados nos parágrafos acima: distorção harmônica individual e distorção harmônica total, e eficiência na filtragem de terceira harmônica; percebe-se que, para esse caso desequilibrado, o filtro eletromagnético possui melhor filtragem nas fases A e B, porém, na fase C, o filtro passivo tem melhor capacidade de filtragem. Logo, em média, o filtro passivo sintonizado, para o sistema desequilibrado, possui melhor desempenho em filtrar terceira harmônica.

#### **4.4 Considerações finais**

Após analisar a resposta do sistema depois da conexão dos filtros e comparar os valores obtidos, tem-se recursos para concluir, em determinada situação, qual pode ser o filtro a ser utilizado.

## 5 CONCLUSÃO

Como resultado principal deste trabalho pode-se dizer que o filtro eletromagnético de sequência zero, quando comparado ao filtro passivo sintonizado (3ª harmônica), em situação de carga equilibrada, apresentou melhor desempenho na filtragem de terceira harmônica, tendo uma melhor eficiência em todos os aspectos analisados. Já em situação de carga desequilibrada, observou-se um melhor desempenho do mesmo perante as fases A e B, onde em média, o filtro passivo sintonizado obteve uma melhor atuação. Ambos os filtros se apresentaram válidos para o intuito do trabalho, e foram condizentes com os resultados esperados.

A modelagem e implementação feita através do *software MatLab*, pelo ambiente *Simulink*, teve seu devido destaque quanto à facilidade que o mesmo oferece, tanto na forma confiável, simples e rápida, quanto na facilidade da interface, com uma biblioteca de blocos gigantesca. Por este motivo, houve o interesse de trabalhar com este software pela facilidade de simulação, interpretação e demonstração dos resultados, através dos gráficos e espectros.

Durante a modelagem computacional foi observada a eficácia de ambos os filtros e os problemas relacionados a sistemas que possuem cargas não-lineares, sendo elas equilibradas e desequilibradas. Apesar da facilidade com o *software*, um dos principais problemas ocorreu durante a modelagem da carga para que a mesma apresentasse os níveis de terceira harmônica necessários para o desenvolvimento deste trabalho.

Este trabalho de conclusão de curso teve suma importância em nossa vida acadêmica. Tivemos grande crescimento acadêmico e pessoal através das discussões com o orientador, pesquisas e leituras, que acarretaram numa experiência que, apesar de todas as dificuldades, só trará proveito em nossas vidas profissionais.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- [1] KASSICK, E. V., "Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão", Florianópolis, UFSC, 2008.
- [2] OLIVEIRA, A. M., "Qualidade da Energia Elétrica," Março 2018.
- [3] EMANUEL, A. E., *Summary of IEEE Stander 1459 : Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.*
- [4] KENNEDY, B. W., *Power Quality Primer*, New York: McGraw-Hill, 2000.
- [5] BELCHIOR, F. N., *UMA NOVA ABORDAGEM À FILTRAGEM DE HARMÔNICOS ATRAVÉS DE DISPOSITIVOS ELETROMAGNÉTICOS*, Uberlândia, 2006.
- [6] FERREIRA, J. F. V., *Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de seqüência zero através de dispositivos eletromagnéticos*, Universidade Federal de Uberlândia , 2006.
- [7] *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8*, 2018.
- [8] IEEE, *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, Project IEEE-519., 2014.
- [9] ISLAM, K.M.S., SAMRA e A.-H, "Identification of harmonic sources in power distribution systems, Southeastcon," *ENGINEERING NEW NEWCENTURY*, pp. 301-303, 1997.
- [10] JOSÉ, W., *PROJETO DE FILTROS PASSIVOS PARA A REDUÇÃO DE CORRENTES HARMÔNICAS NA SUBESTAÇÃO DE 2X300 kVA DA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA DE ÁGUA DO JIQUI*, 2015.
- [11] MARTINS, M. S., *Dimensionamento básico de filtros eletromagnéticos de seqüência positiva e negativa*, Universidade Federal de Itajubá, 2013.
- [12] DUGAN, R. C., *Electrical Power Systems Quality.*, New York: McGraw-Hill, 1996.

- [13] TAVARES, P. H., *Estudo, Projeto e Implantação de Filtros Harmônicos Sintonizados para a Expansão Industrial*, Campinas, 2011.