



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TOCANTINS
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE PALMAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JULIO ALEXANDRE RAMOS GONÇALVES

**PROPOSTA DE MELHORIAS DO PROJETO E PROTÓTIPO DE UM FILTRO
ELETROMAGNÉTICO DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO**

PALMAS/TO

2021

JULIO ALEXANDRE RAMOS GONÇALVES

**PROPOSTA DE MELHORIAS DO PROJETO E PROTÓTIPO DE UM FILTRO
ELETROMAGNÉTICO DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO**

Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof.^a Dra. Stefani Carolline Leal de Freitas.

PALMAS/TO

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Tocantins

G635p Gonçalves, Julio Alexandre Ramos.
 Proposta de Melhorias do Projeto e Protótipo de um Filtro
 Eletromagnético de Correntes de Sequência Zero. / Julio Alexandre Ramos
 Gonçalves. – Palmas, TO, 2021.
 72 f.

 Monografia Graduação - Universidade Federal do Tocantins – Câmpus
 Universitário de Palmas - Curso de Engenharia Elétrica, 2021.
 Orientadora : Stefani Caroline Leal de Freitas

 1. Harmônicos. 2. Mitigação. 3. Filtro Eletromagnético. 4. Proposta de
 Melhorias. I. Título

CDD 621.3

TODOS OS DIREITOS RESERVADOS – A reprodução total ou parcial, de qualquer forma ou por qualquer meio deste documento é autorizado desde que citada a fonte. A violação dos direitos do autor (Lei nº 9.610/98) é crime estabelecido pelo artigo 184 do Código Penal.

Elaborado pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFT com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

JULIO ALEXANDRE RAMOS GONÇALVES

PROPOSTA DE MELHORIAS DO PROJETO E PROTÓTIPO DE UM FILTRO
ELETROMAGNÉTICO DE CORRENTES DE SEQUÊNCIA ZERO

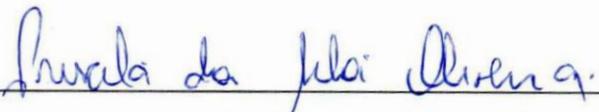
Monografia apresentada à UFT – Universidade Federal do Tocantins – Campus Universitário de Palmas, Curso de Engenharia Elétrica foi avaliada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Data de Aprovação: 15/04/2021

Banca examinadora:



Prof.^a Dra. Stefani Carolline Leal de Freitas, UFT



Prof.^a Dra. Priscila da Silva Oliveira, UFT



Prof.^a Esp. Bianca Carvalho Martins, UFT

PALMAS/TO

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade feliz de ter conseguido completar esta etapa importante da minha vida.

Agradeço muito aos meus pais, Rosinete e Marco, que são as minhas maiores fontes de inspirações e motivações de vida, que me fazem sempre querer seguir em frente e que me deram todo o suporte e apoio necessário para alcançar este objetivo. Sem eles, nada disso seria possível. Agradeço também aos meus irmãos Alessandra e Marcos Vinícius por estarem sempre torcendo pelas minhas conquistas. Amo muito todos vocês!

Agradeço a uma pessoa muito especial e querida, minha namorada Alice, por ser essa pessoa maravilhosa que está sempre me apoiando e que me ajudou incontáveis vezes nesta minha trajetória.

E por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha orientadora Stefani Carolline Leal de Freitas, pela oportunidade que me deu de ser seu orientando em um projeto muito interessante, que apesar do trabalho ter mudado um pouco o rumo, foi uma orientadora sempre muito atenciosa, paciente, compreensível comigo e muito comprometida com este trabalho, sempre orientando e auxiliando da melhor forma possível. Muito obrigado professora! Tenho certeza de que a senhora foi a melhor orientadora que eu poderia ter escolhido.

RESUMO

Sabe-se que um dos principais fatores responsáveis pela “poluição na rede elétrica” são as distorções harmônicas. Tais distúrbios, gerados por cargas não lineares, resultam em efeitos no sistema elétrico prejudicando tanto a qualidade da energia elétrica quanto o funcionamento de equipamentos que estejam conectados ao sistema. Os dispositivos denominados de filtros (ativos e/ou passivos) são projetados para drenar os harmônicos, e é justamente sobre um desses dispositivos que este trabalho contempla: o Filtro Eletromagnético de Sequência Zero. O uso do filtro eletromagnético é uma das técnicas mais empregadas na compensação das componentes de sequência zero, principalmente em circuitos em que há a presença de cargas não lineares como: circuitos retificadores, lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, controladores tiristorizados, entre outros. Assim, quando bem projetado, o dispositivo apresenta uma baixa impedância de sequência zero permitindo que o fluxo das harmônicas dessa sequência flua por ele. Desse modo, no presente trabalho é realizado um estudo sobre filtros eletromagnéticos, suas funcionalidades, ou seja, sua modelagem matemática, o mecanismo para o desvio do fluxo das componentes de sequência zero e seu processo construtivo, a fim de possibilitar a elaboração de critérios que permitam a otimização do projeto de um filtro eletromagnético já implementado, tendo em vista uma maximização da filtragem dos harmônicos para o qual ele se destina, aumentando, portanto, a sua eficiência.

Palavras-chave: Harmônicos. Mitigação. Filtro de Sequência Zero. Proposta de melhorias.

ABSTRACT

It is known that one of the main factors responsible for the "pollution in electric grid" is the harmonics distortions. Such disturbances, which are generated by non-linear loads result in effects on the electrical system harming both the quality of the electrical energy and the operation of equipment that is connected to the system. The devices called filters (active and/or passive) are designed to drain harmonics, and it is precisely one of these devices that this work contemplates: the Zero Sequence Electromagnetic Filter. The use of the electromagnetic filter is one of the techniques most used in the compensation of zero sequence components, especially in circuits where there is the presence of non-linear loads such as: rectifier circuits, fluorescent lamps with electronic ballasts, thyristorized controllers, among others. Thus, when well designed, the device has a low zero sequence impedance allowing the harmonic flow of that sequence to flow through it. So, in the present work a study is carried out on electromagnetic filters, their functionalities, that is, their mathematical modeling, the mechanism for the flow deviation of the zero sequence components and their constructive process, in order to enable the elaboration of criteria that allow the optimization of the design of an electromagnetic filter already implemented, so that a maximization of the filtering of the harmonics for which it is performed can be achieved, thus, increasing its efficiency.

Keywords: Harmonics. Mitigation. Zero Sequence Filter. Improvements proposal.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Filtro eletromagnético conectado em paralelo à rede.	19
Figura 2 – Arraio físico didático do filtro eletromagnético de sequência zero.	20
Figura 3 – Conexões elétricas do filtro eletromagnético de sequência zero.	21
Figura 4 – Indutâncias mútuas: (a) Entre bobinas de uma mesma coluna; (b) Entre bobinas de colunas adjacentes; (c) Entre bobinas de colunas externas.	22
Figura 5 – Circuitos sequenciais desacoplados.	23
Figura 6 – Circuito equivalente simplificado: alimentação, carga não linear e filtro de sequência zero.	23
Figura 7 – Dimensões da placa 6HS-400TF.	30
Figura 8 – Dimensões de cada perna do filtro.	34
Figura 9 – Protótipo do filtro eletromagnético.	37
Figura 10 – Vista frontal.	38
Figura 11 – Visão traseira.	38
Figura 12 – Vista lateral direita.	38
Figura 13 – Vista lateral esquerda.	39
Figura 14 – Vista superior.	39
Figura 15 – Vista frontal sem isolamento externo.	39
Figura 16 – Vista lateral direita sem isolamento externo.	40
Figura 17 – Vista lateral esquerda sem isolamento externo.	40
Figura 18 - Vista traseira sem isolamento externo.	40
Figura 19 – Ambiente esquemático do <i>PSIM</i> ®.	43
Figura 20 – Ambiente de simulação do <i>PSIM</i> ®.	44
Figura 21 – <i>Layout</i> do sistema simulado adaptado de Freitas (2014).	44
Figura 22 – Cargas não lineares equilibradas com valores adaptados de Freitas (2014).	46
Figura 23 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas equilibradas.	46
Figura 24 – Forma de onda da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.	47
Figura 25 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.	47
Figura 26 – Espectro harmônico da corrente da fase A (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.	47

Figura 27 – Espectro harmônico da corrente da fase B (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental	48
Figura 28 – Espectro harmônico da corrente da fase C (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental	48
Figura 29 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.	49
Figura 30 - Formas de onda das correntes das fases A, B e C (com Filtro) com cargas equilibradas.....	50
Figura 31 - Forma de onda da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.	51
Figura 32 – Forma de onda da corrente do neutro com cargas equilibradas destacando o momento da inserção do Filtro no sistema.	51
Figura 33 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.	52
Figura 34 – Espectro harmônico da corrente da fase A (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	52
Figura 35 – Espectro harmônico da corrente da fase B (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.	53
Figura 36 – Espectro harmônico da corrente da fase C (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.	53
Figura 37 – Espectro harmônico da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.	54
Figura 38 – Espectro harmônico (a) percentual da fundamental da fase A (sem e com o Filtro); (b) amplitude da corrente do neutro (sem e com o Filtro).....	55
Figura 39 – Cargas não lineares desequilibradas com valores adaptados de Freitas (2014)....	56
Figura 40 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas desequilibradas.	56
Figura 41 – Forma de onda da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas...	57
Figura 42 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.	57
Figura 43 – Espectro harmônico da corrente da fase A (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	58
Figura 44 – Espectro harmônico da corrente da fase B (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	58

Figura 45 – Espectro harmônico da corrente da fase C (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	58
Figura 46 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.	59
Figura 47 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (com Filtro) com cargas desequilibradas.	60
Figura 48 - Forma de onda da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas...	61
Figura 49 – Forma de onda da corrente do neutro com cargas desequilibradas destacando o momento da inserção do Filtro no sistema.	62
Figura 50 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.	62
Figura 51 – Espectro harmônico da corrente da fase A (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	63
Figura 52 – Espectro harmônico da corrente da fase B (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	63
Figura 53 – Espectro harmônico da corrente da fase C (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.....	63
Figura 54 – Espectro harmônico da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.	64
Figura 55 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem e com o Filtro).....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Especificações de operação do filtro utilizadas por Oliveira (2016).....	27
Tabela 2 - Parâmetros calculados para o dimensionamento do filtro em Oliveira (2016).	27
Tabela 3 – Resultados para as diretrizes de projeto e para a bitola adotada em Oliveira (2016).	36
Tabela 4 – Correntes RMS das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas equilibradas	46
Tabela 5 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (sem Filtro) e com cargas equilibradas.....	48
Tabela 6 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.....	49
Tabela 7 - Correntes RMS das fases A, B e C (com Filtro) com cargas equilibradas.....	50
Tabela 8 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (com Filtro) e com cargas equilibradas.....	53
Tabela 9 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.....	54
Tabela 10 – Correntes RMS das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas desequilibradas	56
Tabela 11 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (sem Filtro) e com cargas desequilibradas	59
Tabela 12 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.	59
Tabela 13 – Correntes RMS das fases A, B e C (com Filtro) com cargas desequilibradas.....	61
Tabela 14 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (com Filtro) e com cargas desequilibradas	64
Tabela 15 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.	64
Tabela 16 – Resumo dos valores de THD das fases e da corrente do neutro.....	68

LISTA DE SIGLAS

PAC: Ponto de acoplamento comum

LISTA DE SÍMBOLOS

L_f :	Indutância própria da bobina
L_{inf} :	Indutância mútua das bobinas de uma mesma coluna
M :	Indutância mútua entre bobinas de colunas diferentes
k :	Coefficiente de acoplamento magnético
$i_{0_F}(t)$:	Corrente de sequência zero através do filtro de sequência zero
$i_{0_C}(t)$:	Corrente de sequência zero gerada pela carga não linear
$i_{0_S}(t)$:	Corrente de sequência zero que flui pelo sistema supridor
Z_{0_S} :	Impedância de sequência zero do sistema de suprimento
Z_{0_s} :	Impedância de sequência zero do filtro de sequência zero
V_L :	Tensão de linha
f :	Frequência de operação
$S_{3\phi}$:	Potência trifásica
B :	Densidade de fluxo magnético
V_F :	Tensão de fase (tensão sobre cada bobina)
S_{ϕ} :	Potência por fase
I_1 :	Corrente no primário
I_2 :	Corrente do secundário
s_1 :	Seção da bitola do primário
s_2 :	Seção da bitola do secundário
d :	Densidade de corrente (por fase)
S_m :	Seção magnética do núcleo
S_g :	Seção geométrica do núcleo
a :	Largura de cada coluna da lâmina do núcleo
b :	Profundidade do núcleo
V_{eq} :	Tensão equivalente de fase (tensão real sobre cada bobina)
N_1, N_2 :	Número de espiras do primário e secundário, respectivamente
S_{cu} :	Seção total do cobre
H_j :	Altura da janela no núcleo
L_j :	Largura da janela do núcleo
P_{fe} :	Peso do ferro

l_m :	Comprimento da espira média da bobina
P_{cu} :	Peso do cobre
r_1, r_2 :	Resistências do fio de cobre do primário e secundário respectivamente
W_{cu} :	Perdas no cobre
l :	Comprimento de uma espira
l' :	Comprimento de uma bobina
l_T :	Comprimento total de cobre

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos gerais	17
1.3	Objetivos específicos.....	17
1.4	Metodologia.....	17
1.5	Organização do trabalho	18
2	FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO – FUNCIONALIDADES E DIRETRIZES	19
2.1	Considerações iniciais	19
2.2	Filtro de Sequência Zero.....	19
2.2.1	Equacionamento.....	20
2.2.2	Fundamentação Física do Desvio do Fluxo das harmônicas	23
2.3	Considerações Finais	24
3	DIRETRIZES E CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PROJETO.....	26
3.1	Considerações Iniciais	26
3.2	Diretrizes do Projeto	26
3.2.1	Dados Iniciais	27
3.2.2	Cálculos de Projeto	30
3.2.3	Estimativas de Perdas	33
3.3	Análise visual	37
3.4	Considerações Finais	41
4	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	43
4.1	Considerações iniciais	43
4.2	Sistema simulado	43
4.2.1	Sistema com cargas equilibradas	45
4.2.2	Sistemas com cargas desequilibradas	55
4.3	Considerações finais	66
	CONCLUSÃO.....	67
	REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

Há algum tempo tem-se estudado sobre os aspectos que definem a qualidade das redes elétricas, e um dos assuntos que perdura é a chamada distorção harmônica, o que leva ao desenvolvimento de dispositivos e técnicas para sua mitigação (BELCHIOR, 2006).

Harmônicos no sistema elétrico são sinais de ondas periódicas de corrente ou tensão que se caracterizam por apresentarem forma distorcida ou sem conformidade senoidal, sendo o resultado da sobreposição de ondas compostas por uma componente fundamental e um conjunto de ondas com frequências múltiplas inteiras dessa componente, em que esse conjunto é chamado de harmônicos e são os responsáveis pelo menor ou maior grau de distorção da onda (LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES, 2013).

As correntes harmônicas, que são geradas pela descontinuidade da corrente devido à presença de cargas não lineares, apresentam em sua estrutura uma resposta distorcida em relação ao sinal elétrico de frequência fixa aplicado ao sistema em questão (FIGUEREDO, 1986). O fluxo das correntes harmônicas numa rede faz com que apareçam tensões harmônicas sobre as impedâncias presentes e, uma das consequências disso, é que se uma carga linear em paralelo for alimentada por esse tipo de tensão, a corrente que fluirá também será distorcida devido à semelhança nas formas de onda de tensão e corrente em que, além de outros problemas, pode ser erroneamente atribuída a essa carga linear como parte da fonte da distorção harmônica presente no ponto de acoplamento comum (PAC) (MANTOVANI, 2011).

As soluções para a mitigação dos harmônicos no sistema elétrico se dividem basicamente em duas: medidas atuando diretamente na carga fonte dos harmônicos e, as mais comumente empregadas, a utilização de filtros de potência ativos, passivos ou híbridos. Em relação à primeira, trata-se de medidas operacionais que podem ser adotadas a fim de adequar as cargas geradoras de harmônicos como, por exemplo, fazendo a alteração da topologia das redes elétricas já existentes (RAVAGNANI, 2008) ou em novas instalações, ou então na substituição de equipamentos (RIBEIRO, 2003). A segunda solução diz respeito a uma medida corretiva utilizando filtros ativos e/ou passivos (RIBEIRO, 2003; D'ÁVILA FILHO, 2008; PIRES, 2010; DA SILVA, 2012) para reduzir ou eliminar as distorções harmônicas, apresentando vantagem em relação à primeira por não exigir, por exemplo, a substituição de equipamentos existentes no sistema elétrico (RIBEIRO, 2003).

Levando em conta o exposto, dentre os filtros passivos se destacam os filtros eletromagnéticos, que são dispositivos que apresentam baixa impedância para as harmônicas “*triplens*”, ou seja, as múltiplas de terceira ordem que, nesse caso, são as harmônicas de

sequência zero ($h = 3^a, 9^a, 15^a, \dots$), e apresentam elevada impedância para as harmônicas de sequência positiva e negativa (BUZO, 2016). Isso significa que um filtro eletromagnético de sequência zero tem a capacidade de confinar as harmônicas dessa sequência, diminuindo os efeitos de circulação de correntes no condutor neutro, resultando também em um aumento do fator de potência do sistema elétrico (DAHONO, 2002; BELCHIOR, 2006; APOLÔNIO, 2005).

A necessidade da implementação de dispositivos de filtragem harmônica para conexão à rede ou em composição com circuitos de determinados equipamentos, decorre dos problemas de qualidade de energia que surgem devido à presença de harmônicos, por exemplo, disparos imprevistos de disjuntores, sobreaquecimento de transformadores e motores, correntes excessivas nos condutores neutros, entre outros. Além disso, a presença de equipamentos eletrônicos e bancos de capacitores num mesmo sistema elétrico podem resultar na amplificação dos sinais de tensão e corrente devido à ressonância (fenômeno gerado pela presença de elementos indutivos e capacitivos na rede), gerando alterações nas impedâncias presentes modificando as formas de onda de tensão e corrente (LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES, 2014).

Desta forma, para que se possa ter um alto rendimento com máximo desempenho desse tipo de dispositivo, é necessária uma ótima elaboração e execução de seu projeto, requerendo, portanto, uma construção aprimorada do filtro para que ele possa confinar de forma efetiva os harmônicos da sequência para o qual se desempenha.

1.1 Justificativa

No âmbito da Universidade Federal do Tocantins-UFT e do curso de Engenharia Elétrica, foi projetado, simulado e implementado um filtro eletromagnético de sequência zero por Oliveira (2016). Este trabalho apresentou resultados animadores, no entanto, mostrou também que a maximização da filtragem de harmônicos pode ser alcançada fazendo um estudo de revisão dos cálculos e do processo construtivo do filtro. Diante disso, o tema do trabalho é justamente fazer um estudo sobre o funcionamento e os aspectos construtivos dos filtros eletromagnéticos e, então, utilizar desse estudo para revisar os cálculos e todo o processo construtivo do dispositivo, para que com as diretrizes de maximização elaboradas de acordo com Martgnoni (1991) e McLyman (2004), seja possível fazer uma proposta de reforma do protótipo a fim de aumentar o seu desempenho.

1.2 Objetivos gerais

Propor a otimização de um filtro eletromagnético de correntes de sequência zero implementado em Oliveira (2016).

1.3 Objetivos específicos

- Fazer revisão bibliográfica da funcionalidade e modelagem matemática de filtros passivos eletromagnéticos de sequência zero;
- Realizar um estudo sobre a construção de filtros eletromagnéticos;
- Descrever revisão bibliográfica dos cálculos para projeto de protótipos de filtros eletromagnéticos a partir das premissas de cálculos para transformadores de potência;
- Analisar visualmente o filtro eletromagnético implementado;
- Propor melhorias físicas para o protótipo;
- Simular um modelo do filtro eletromagnético com os parâmetros propostos.

1.4 Metodologia

Este trabalho constitui-se de uma pesquisa experimental, tendo como objeto de estudo o filtro eletromagnético de correntes de sequência zero implementado em Oliveira (2016). A primeira parte consiste em um levantamento bibliográfico sobre filtros eletromagnéticos de correntes de sequência zero, fazendo um estudo sobre seu funcionamento na filtragem harmônica, sua modelagem matemática e os cálculos necessários utilizados para o seu projeto.

A segunda parte consiste em fazer uma revisão dos cálculos utilizados para a sua implementação e uma análise visual do filtro no que diz respeito aos seus aspectos físicos.

A terceira e última parte do trabalho trata-se de uma proposta de reforma do protótipo em concordância com as diretrizes elaboradas de acordo com os dados obtidos no estado atual do filtro. Logo, por meio de simulações, serão obtidos resultados a fim de vislumbrar o seu desempenho em relação a uma futura otimização.

1.5 Organização do trabalho

O trabalho está organizado em 5 capítulos a fim de apresentar uma abordagem coerente do objeto de estudo. O capítulo 1 tratou da contextualização e motivação do tema proposto, expondo, na Introdução, os conceitos e aspectos fundamentais no que diz respeito ao foco deste trabalho. Foi apresentada, na Justificativa, a motivação para a escolha do tema e, nesse contexto, foram definidos os objetivos e a metodologia abordada com a finalidade de delimitar de forma clara e concisa os passos a serem executados na elaboração do projeto.

O capítulo 2 trata da fundamentação teórica e equacionamento do filtro eletromagnético, apresentando as funcionalidades do dispositivo e expondo como o dispositivo confina os harmônicos por meio da fundamentação física do desvio do fluxo de harmônicas.

O capítulo 3 traz a elaboração das diretrizes e critérios de otimização do projeto, abordando os cálculos para a implementação de um filtro eletromagnético, dando ênfase a uma proposta de projeto considerando alguns parâmetros diferentes do projeto original a fim justificar uma otimização. Além disso, é feita uma verificação do estado físico atual do filtro por meio de uma inspeção visual.

O capítulo 4 traz simulações computacionais com dados do projeto do filtro eletromagnético otimizado no capítulo 3. Os resultados das simulações indicam as expectativas de atuação do filtro após sua reforma física.

O capítulo 5 traz as conclusões gerais do trabalho, em que são discutidos os resultados obtidos e tratados ao longo do projeto e são feitas também algumas sugestões para trabalhos futuros.

2 FILTRO ELETROMAGNÉTICO DE SEQUÊNCIA ZERO – FUNCIONALIDADES E DIRETRIZES

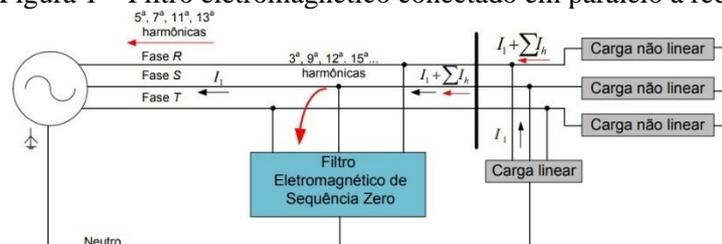
2.1 Considerações iniciais

Como visto no Capítulo 1, uma das técnicas utilizadas para a mitigação de componentes harmônicas de sequência zero é mediante o uso de dispositivos eletromagnéticos, uma solução que se torna economicamente viável por não necessitar de recursos que geralmente são empregados em outros arranjos e por apresentar robustez em seu esquema de filtragem harmônica (BELCHIOR, 2006). Para que esse dispositivo possa desempenhar sua função de atenuação, é necessário que ele apresente um caminho de baixa impedância para as harmônicas mencionadas, sendo isso possível com a utilização de um arranjo de enrolamentos eletromagnéticos interligados em zigue-zague (FERREIRA, 2006).

2.2 Filtro de Sequência Zero

De acordo com o que foi explanado, o filtro eletromagnético de correntes de sequência zero fornece um caminho de baixa impedância para as harmônicas “*triplens*”, assim, quando conectado em paralelo a uma carga geradora de harmônicos, o filtro exerce a função de reduzir o fluxo das componentes harmônicas de sequência zero no sistema elétrico, ou seja, o conteúdo harmônico não é alterado e sim desviado, fazendo com que essas componentes circulem apenas entre o circuito composto pela carga geradora e o filtro eletromagnético (FERREIRA, 2006). A Figura 1 a seguir exemplifica o funcionamento do dispositivo conectado à rede na presença de cargas geradoras de harmônicos.

Figura 1 – Filtro eletromagnético conectado em paralelo à rede.



Fonte: Freitas (2014).

Pela Figura 1, observa-se que as harmônicas de terceira ordem e seus múltiplos são desviadas pelo filtro, enquanto as demais harmônicas, de sequência positiva e negativa

continuam a fluir pelo sistema. A necessidade do uso desse tipo de dispositivo em um sistema elétrico deve-se ao fato dos efeitos ocasionados pela presença de correntes harmônicas na rede como, por exemplo, sobrecarga nos condutores neutros em que, pode resultar em diferenças de potencial entre o neutro e o terra, ruídos, entre outros fatores (RAVAGNANI, 2008). Outros efeitos que as distorções harmônicas geram são nos equipamentos como motores de indução e máquinas síncronas, que podem sofrer com sobretensões, sobreaquecimentos (que implicam nas perdas no cobre e no ferro) e operações indevidas. Em transformadores, além de outros efeitos, as correntes harmônicas também causam sobreaquecimento resultando nas perdas no cobre e perdas devido ao fluxo de dispersão (GARCIA, 2008). Assim, o filtro eletromagnético de sequência zero opera a fim de minimizar a intensidade desses efeitos.

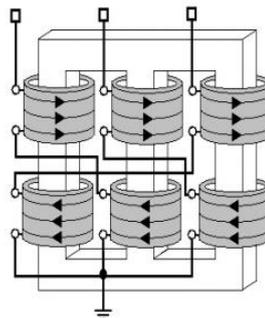
2.2.1 Equacionamento

O desenvolvimento detalhado do modelo matemático para a representação analítica do filtro eletromagnético de sequência zero pode ser encontrado em Ravagnani (2008).

Neste trabalho será exposto de forma mais sucinta o equacionamento e as simplificações utilizadas para evidenciar a dependência da indutância de sequência zero com os aspectos construtivos do filtro eletromagnético.

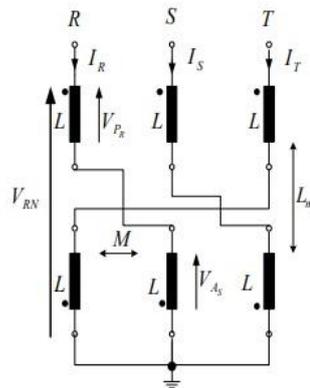
A estrutura do filtro eletromagnético de sequência zero é composta por um núcleo magnético de três colunas e duas bobinas em cada coluna, denominadas principal e auxiliar, possuindo o mesmo número de espiras dispostas em cada braço magnético. Cada coluna tem conexão com uma fase por meio da bobina principal, que por sua vez, se interliga com uma auxiliar de outra fase e estas se conectam ao condutor neutro, resultando, portanto, numa conexão zigue-zague (RAVAGNANI, 2007). O arranjo didático do dispositivo é ilustrado nas Figuras 2 e 3 a seguir.

Figura 2 – Arranjo físico didático do filtro eletromagnético de sequência zero.



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Figura 3 – Conexões elétricas do filtro eletromagnético de sequência zero.



Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

A modelagem matemática do filtro baseia-se em encontrar expressões que representem circuitos sequenciais desacoplados para que possa ser feita uma análise individual das impedâncias sequenciais, em específico a dependência da impedância de sequência zero. Sendo assim, é necessário que se encontre a relação das componentes sequenciais de tensão e corrente. Por se tratar de um dispositivo trifásico, a sua funcionalidade depende fortemente da disposição dos conjuntos de bobinas, que, por sua vez, implicam em acoplamentos mútuos que impactam diretamente no comportamento da impedância característica do filtro em relação às componentes sequenciais de tensão e corrente (RAVAGNANI, 2008).

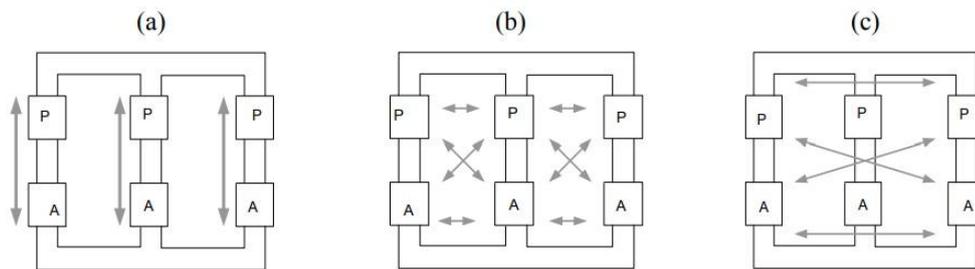
O equacionamento é desenvolvido partindo das equações de tensão nos conjuntos de bobinas no domínio do tempo e então as transformando para o domínio da frequência. Usando alguns artifícios que podem ser encontrados em Ravagnani (2008), determina-se as tensões sequenciais de acordo com a impedância característica do filtro. Devido sua similaridade construtiva de enrolamentos, seus aspectos geométricos e construtivos do núcleo, diversas simplificações podem ser feitas sem que altere a precisão do modelo matemático, uma vez que o foco da análise desse filtro eletromagnético diz respeito somente às componentes de sequência zero, portanto, a seguir estão as simplificações utilizadas e o modelo matemático resultante para análise do circuito sequencial desacoplado.

- Bobinas principais iguais às bobinas auxiliares;
- Operação dentro da região linear;
- Indutâncias mútuas entre as bobinas principais e auxiliares de uma mesma coluna iguais;
- Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e adjacentes iguais;

- Indutâncias mútuas entre bobinas principais e auxiliares de colunas distintas e externas iguais;
- Indutâncias mútuas das colunas adjacentes e das colunas externas iguais (para efeito de análise) (RAVAGNANI, 2008).

A Figura 4 ilustra a relação das indutâncias mútuas entre os enrolamentos principais e auxiliares do filtro.

Figura 4 – Indutâncias mútuas: (a) Entre bobinas de uma mesma coluna; (b) Entre bobinas de colunas adjacentes; (c) Entre bobinas de colunas externas.



Fonte: (FREITAS, 2014).

Com as simplificações, obtêm-se a equação (1) a seguir que expressa as relações entre as tensões e correntes sequenciais:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_0 \\ \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix} = j\omega h \begin{bmatrix} 2(L_f - L_{inf}) & 0 & 0 \\ 0 & 2L_f + L_{inf} + 3M & 0 \\ 0 & 0 & 2L_f + L_{inf} + 3M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_0 \\ \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Em que:

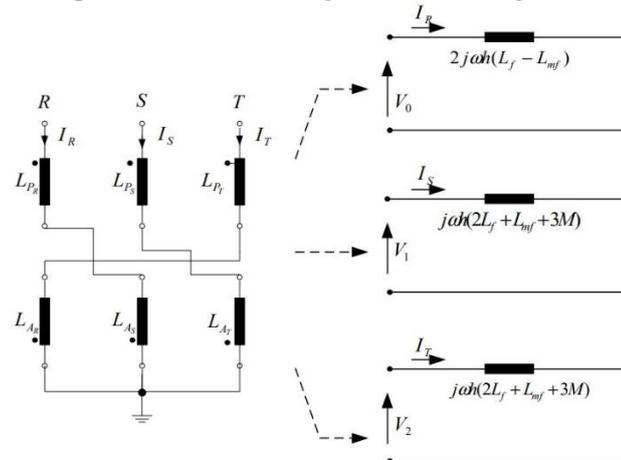
L_f : indutância própria da bobina;

L_{inf} : indutância mútua das bobinas de uma mesma coluna;

M : indutância mútua entre bobinas de colunas diferentes.

A partir da equação (1), observa-se que as conexões elétricas apresentadas na Figura 3 podem agora ser representadas por meio de circuitos sequenciais desacoplados como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Circuitos sequenciais desacoplados.



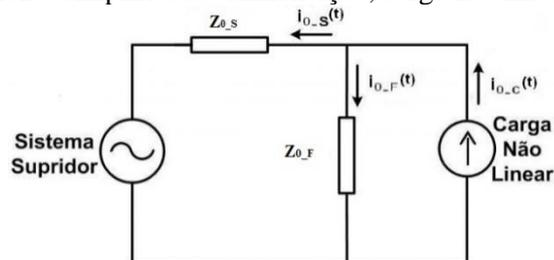
Fonte: (OLIVEIRA *et al.*, 2010).

Assim, com a equação (1) e a Figura 5, verifica-se que a funcionalidade do filtro na filtragem das componentes de seqüência zero está intimamente relacionada com o acoplamento magnético das bobinas de uma mesma coluna, pois, quanto melhor esse acoplamento, ou seja, fator de acoplamento entre L_f e L_{inf} se aproximar do valor unitário $k = 1$, menor será a impedância de seqüência zero e, portanto, mais eficaz será a ação do filtro eletromagnético no desvio do fluxo das componentes de seqüência zero (RAVAGNANI, 2008).

2.2.2 Fundamentação Física do Desvio do Fluxo das harmônicas

Pela Figura 1, observa-se que a inserção do filtro ao sistema é feita em paralelo com uma carga não linear ou um conjunto delas. É evidente que existe uma forte dependência do filtro eletromagnético em relação à sua impedância e a impedância do sistema supridor (BELCHIOR, 2006), o circuito equivalente simplificado de seqüência zero na Figura 6 ilustra isso.

Figura 6 – Circuito equivalente simplificado: alimentação, carga não linear e filtro de seqüência zero.



Fonte: Adaptado de Belchior (2006).

Utilizando um divisor de corrente no circuito da Figura 6, resulta na equação (2) a seguir, que expressa a corrente de sequência zero que passa pelo filtro:

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

Em que:

$i_{0_F}(t)$ – Corrente de sequência zero através do filtro de sequência zero;

$i_{0_C}(t)$ – Corrente de sequência zero gerada pela carga não linear;

Z_{0_S} – Impedância de sequência zero do sistema de suprimento;

Z_{0_F} – Impedância de sequência zero do filtro de sequência zero;

Analisando a equação (2), observa-se que quanto menor for a impedância de sequência zero do filtro em relação à impedância do sistema, maior será a drenagem das correntes harmônicas de sequência zero e, portanto, maior será sua eficiência (FERREIRA, 2006).

Já a corrente que flui para o sistema de suprimento é dada pela equação (3):

$$i_{0_S}(t) = \frac{Z_{0_F}}{Z_{0_F} + Z_{0_S}} \cdot i_{0_C}(t) \quad (3)$$

Analisando a equação (3), fica evidente que quanto menor for a impedância de sequência zero em relação à impedância do sistema de suprimento, menor será a corrente de sequência zero que fluirá pelo circuito do sistema supridor, portanto, maior será a eficiência do filtro eletromagnético. Algo a ser observado é que certamente a ocorrência dessa situação dependerá da localização da instalação do filtro no sistema elétrico, o que demonstra os efeitos que o sistema pode causar no funcionamento do dispositivo (FERREIRA, 2006).

2.3 Considerações Finais

Este capítulo teve como objetivo apresentar os conceitos e fundamentos a respeito das componentes harmônicas, dando ênfase nas componentes de terceira ordem e seus múltiplos e do dispositivo utilizado para a drenagem das mesmas. Foi destacada também, a necessidade da inserção desse tipo de dispositivo no sistema elétrico ou em conjunto de equipamentos, ressaltando os efeitos causados por esses harmônicos tanto no sistema elétrico em si quanto em equipamentos elétricos como motores, transformadores etc.

De acordo com a análise da modelagem matemática do filtro, constata-se que o principal parâmetro de influência na eficiência do dispositivo é o fator de acoplamento magnético das bobinas de uma mesma coluna, visto que quanto melhor for esse acoplamento, ou seja, mais próximos forem os valores das indutâncias próprias das bobinas em relação à indutância mútua dessas mesmas bobinas, menor será a impedância de sequência zero, implicando numa melhor filtragem das harmônicas “*triplens*” pelo filtro. Diante disso, foi averiguado também sobre o comportamento das correntes de sequência zero geradas por cargas não lineares na presença de um filtro eletromagnético conectado em paralelo ao sistema supridor, verificando que de fato a relação do desvio do fluxo para o filtro depende fortemente do quão menor é a sua impedância intrínseca em relação à impedância do sistema supridor

3 DIRETRIZES E CRITÉRIOS DE OTIMIZAÇÃO DO PROJETO

3.1 Considerações Iniciais

Como já mencionado, o filtro eletromagnético de correntes de sequência zero implementado em Oliveira (2016) é o objeto de estudo deste trabalho, assim, para a sua otimização, é necessário que seja feita uma avaliação da elaboração do seu projeto, dos parâmetros utilizados e dos cálculos realizados para sua implementação. Os tópicos seguintes abordam alguns dados do projeto original, as especificações de operação utilizadas, discussões sobre algumas falhas na escolha de certos parâmetros e algumas alternativas a fim de tentar aperfeiçoar o projeto em questão, visto que o foco é o melhoramento do desempenho da filtragem harmônica das “*triplens*”. Além disso, é feita uma análise visual do filtro com objetivo de verificar o seu estado atual e propor algumas mudanças que possibilitem melhorias no equipamento como um todo.

3.2 Diretrizes do Projeto

Como já apresentado, o dispositivo é constituído de um núcleo trifásico e 3 pares de bobinas, onde cada fase é conectada à saída de uma bobina de cada par. Cada par de bobinas são inseridas com polaridades opostas em cada uma das pernas do núcleo trifásico de forma que o fechamento dos enrolamentos seja a conexão zigue-zague (BELCHIOR, 2006), portanto, os passos para o projeto de um filtro eletromagnético são os mesmos para o projeto de transformadores trifásicos, visto que o filtro trifásico se trata de um autotransformador com conexão zigue-zague (OLIVEIRA, 2016). Assim, de acordo com a teoria apresentada, o filtro deve ser projetado de tal forma que sua impedância de sequência zero deva ser a mínima possível para que a filtragem harmônica seja eficiente, sendo necessário, portanto, uma ótima elaboração e execução do seu projeto. Nesse sentido, os itens a seguir apresentam uma análise dos dados do projeto de Oliveira (2016), destacando os parâmetros utilizados pelo mesmo. A partir disso, são realizados novos cálculos de projeto com o intuito de demonstrar um aumento do desempenho do filtro, principalmente no que diz respeito a redução das perdas.

3.2.1 Dados Iniciais

As Tabelas 1 e 2 mostram as especificações de operação utilizadas e resultados dos cálculos realizados para o projeto do filtro no trabalho do autor supracitado.

Tabela 1 – Especificações de operação do filtro utilizadas por Oliveira (2016).

Nível de Tensão V_L (V)	Frequência de operação f (Hz)	Potência trifásica $S_{3\phi}$ (VA)	Densidade de Fluxo Magnético B (Gauss)	Relação de transformação	Conexão das bobinas
220	60	450	13000	1:1	Zigue-Zague

Fonte: Elaboração própria com dados de Oliveira (2016).

Tabela 2 - Parâmetros calculados para o dimensionamento do filtro em Oliveira (2016).

PARÂMETROS		RESULTADOS
Tensão	Tensão de fase V_F do filtro (V)	127,017
Potência	Por fase S_{ϕ} (VA)	150
Correntes	Primário I_1 (A)	1,299
	Secundário I_2 (A)	1,181
Bitolas dos fios calculadas	Primário s_1 (mm ²)	0,433
	Secundário s_2 (mm ²)	0,394
Bitola real dos fios	Primário s_1 (mm ²)	0,16 (25 AWG)
	Secundário s_2 (mm ²)	0,16 (25 AWG)
Seção magnética	Calculada S_m (cm ²)	11,859
	Real S_m (cm ²)	14,546
Seção geométrica	Calculada S_g (cm ²)	13,044
	Real fixada S_g (cm ²)	16
Dimensões do núcleo	Largura “a” (cm)	4
	Profundidade “b” (cm)	4

Fonte: Elaboração própria com dados de Oliveira (2006).

A referência Martignoni (1991) foi utilizada como base para as equações usadas nos cálculos da Tabela 2 e muitas delas serão empregadas para os cálculos que aqui serão apresentados, assim têm-se as equações (4) a (12) a seguir:

$$V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (4)$$

$$S_{\phi} = \frac{S_{3\phi}}{3} \quad (5)$$

$$I_1 = 1,1 \cdot \frac{S_{\phi}}{V_F} \quad (6)$$

$$I_2 = \frac{S_\varphi}{V_F} \quad (7)$$

$$s_1 = \frac{I_1}{d} \quad (8)$$

$$s_2 = \frac{I_2}{d} \quad (9)$$

Em que:

V_L : Tensão de linha;

V_F : Tensão de fase;

$S_{3\varnothing}$: Potência trifásica;

S_\varnothing : Potência por fase;

I_1 : Corrente no primário;

I_2 : Corrente no secundário;

s_1 : Seção do fio de cobre do primário;

s_2 : Seção do fio de cobre do secundário.

E “d” é a densidade de corrente por fase dada em A/mm² e depende da potência de projeto do filtro, no caso de potência por fase inferior a 500 [VA] utiliza-se $d = 3$.

$$S_m = 7,5 \cdot \sqrt{\frac{S_\varphi}{f}} \quad (10)$$

$$S_g = 1,1 \cdot S_m \quad (11)$$

$$a \cong \sqrt{S_g} \quad (12)$$

Em que:

S_m : Seção magnética do núcleo;

f : frequência de operação;

S_g : Seção geométrica do núcleo;

a : Largura das colunas da lâmina.

O valor da largura “a” é calculado extraindo a raiz do valor da seção geométrica como mostra a equação (12), nesse caso, de acordo com o trabalho de Oliveira (2016), resultaria em

$a = 3,612$ cm, porém, por razões de inviabilidade das lâminas serem cortadas, Oliveira (2016) optou por lâminas padronizadas 6HS-400TF ilustrada na Figura 7, sendo a largura “a” igual a profundidade “b” de valor 4 cm.

Algumas observações sobre os parâmetros adotados e os cálculos realizados em Oliveira (2016) podem ser feitas aqui, visto que certamente foram empecilhos para alcançar a eficiência do filtro de sequência zero.

A primeira é na escolha da seção dos condutores, em que não foi considerada a densidade de corrente, embora tenha respeitado a capacidade do fio, assim, a maior seção calculada foi de $0,433 \text{ mm}^2$, que de acordo com a tabela de fabricantes de fio de cobre, acessível no site da Eletric Vale (disponível nas Referências), a escolha seria o condutor de seção $0,52 \text{ mm}^2$ (20 AWG) e não 25 AWG que tem seção $0,16 \text{ mm}^2$, porém, a funcionalidade do filtro não foi comprometida com o 25 AWG, visto que a seção escolhida suporta as correntes calculadas, ainda assim, antes mesmo da análise visual do dispositivo, já é possível supor que há um espaço considerável na área das janelas que não está sendo ocupado pelas bobinas, o que impacta diretamente na impedância de sequência zero devido o aumento das perdas por dispersão.

Outro detalhe que pode ser observado é sobre a potência utilizada, o dispositivo com toda certeza suporta uma potência maior para o seu projeto, uma vez que a potência máxima a ser processada está diretamente ligada com a seção magnética do núcleo, assim, utilizando uma potência de projeto mais próxima da potência limite do dispositivo, a seção dos fios aumentará e implicará num maior preenchimento da área da janela diminuindo as perdas por dispersão.

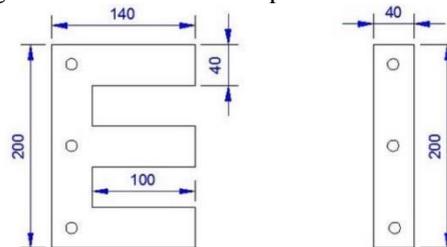
Nesse contexto, na próxima seção serão realizados cálculos aumentando a potência de projeto, serão consideradas duas situações em que, para ambas, será utilizada uma potência de projeto de 640VA e a mesma tensão de fase adotada em Oliveira (2016): a primeira situação será para as diretrizes de projeto, em que as bitolas dos fios serão escolhidas de forma mais adequada de acordo com a seção calculada considerando a densidade de corrente da bobina e, a segunda situação, será considerando a seção utilizada em Oliveira (2016), ou seja, desconsiderando a densidade de corrente da bobina. Para ambas, serão calculadas também, o peso do cobre, o comprimento total de cobre e as estimativas das perdas no cobre e no núcleo (caso seja possível). Vale ressaltar que as lâminas que foram utilizadas na implementação do filtro são padronizadas, implicando em certos parâmetros fixos que obviamente não precisarão ser calculados.

Dados iniciais para o projeto para as duas situações já mencionadas:

- Nível de tensão linha: 220 V;

- Nível de tensão fase: 127 V;
- Frequência de operação: 60 Hz;
- Potência de projeto: 640 VA (213,333 VA/fase);
- Densidade de Fluxo Magnético: 13000 Gauss;
- Relação de transformação: 1:1;
- Conexão das bobinas: Zigue-zague.

Figura 7 – Dimensões da placa 6HS-400TF.



Fonte: (OLIVEIRA, 2016).

3.2.2 Cálculos de Projeto

Além das fórmulas já citadas, algumas outras serão utilizadas tendo como mesma referência Martignoni (1991).

A. Situação 1 - Considerando a capacidade de corrente no fio e a densidade de corrente da bobina

Para a potência de 640VA, têm-se as seguintes dimensões do núcleo dadas pelas equações (13) a (15):

$$S_m = 7,5 \times \sqrt{\frac{S_\varphi}{f}} = 7,5 \times \sqrt{\frac{213,333}{60}} = 14,142 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (13)$$

$$S_g = 1,1 \times S_m = 1,1 \times 14,142 = 15,556 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (14)$$

$$a \cong \sqrt{S_g} = \sqrt{15,556} = 3,944 \text{ [cm]} \quad (15)$$

Assim, é necessário usar uma lâmina com largura superior a 3,944 cm que, no caso, é justamente a placa que foi utilizada na implementação do filtro, com largura $a = 4$ cm. Fazendo a profundidade $b = 4$ cm temos o valor fixo de $S_g = 16 \text{ cm}^2$, assim, $S_m = 14,545 \text{ cm}^2$.

A tensão equivalente para cada uma das fases é encontrada fazendo uma análise do diagrama fasorial da ligação zigue-zague, a análise detalhada pode ser encontrada em Ravagnani (2008) e chega-se a equação (16):

$$V_{eq} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times V_f = \frac{\sqrt{3}}{2} \times 127 \cong 110[V] \quad (16)$$

Utilizando-se as equações (6) a (9), calculam-se as correntes do primário e secundário e as bitolas dos fios, expressas pelas equações (17) a (20)

:

$$I_1 = \frac{1,1 \times S_\varphi}{V_F} = \frac{1,1 \times 213,333}{127} = 1,848 [A] \quad (17)$$

$$I_2 = \frac{S_\varphi}{V_F} = \frac{213,333}{127} = 1,680 [A] \quad (18)$$

$$s_1 = \frac{I_1}{d} = \frac{1,848}{3} = 0,616 [mm^2] \quad (19)$$

$$s_2 = \frac{I_2}{d} = \frac{1,680}{3} = 0,560 [mm^2] \quad (20)$$

Então, com relação a maior seção entre as duas acima calculadas, utiliza-se o fio de bitola 19 AWG com seção $0,65 \text{ mm}^2$, logo, $s_1 = s_2 = 0,65 \text{ mm}^2$.

Para o número de espiras de cada bobina, têm-se a equação (21):

$$N_1 = N_2 = \frac{V_F \times 10^8}{4,44 \times B \times S_m \times f} = \frac{127 \times 10^8}{4,44 \times 13000 \times 14,545 \times 60} \cong 253 [espiras] \quad (21)$$

A partir disso, pode ser calculada a seção total do cobre, dada pela equação (22):

$$S_{cu} = N_1 \times s_1 + N_2 \times s_2 = 253 \times 0,65 + 253 \times 0,65 = 328,9 [mm^2] \quad (22)$$

Como as lâminas são padronizadas e não foi possível cortá-las, a altura da janela H_j e a largura da janela L_j têm medidas dadas pelas equações (23) e (24):

$$H_j = 100 [mm] \quad (23)$$

$$L_j = 40 [mm] \quad (24)$$

O peso do ferro é fixo, pois se trata da quantidade usada por Oliveira (2016), e é dado pela equação (25):

$$P_{fe} = 5,43 [kg] \quad (25)$$

Para o cálculo do peso do cobre, calcula-se o comprimento da espira média da bobina que é dada pela equação (26):

$$l_m = 2a + 2b + 0,5 \times L_j \times \pi = 2 \times 4 + 2 \times 4 + 0,5 \times 40 \times \pi = 22,283 [cm] \quad (26)$$

A partir disso, calcula-se o peso total do cobre dado pela equação (27):

$$P_{cu} = \frac{0,27 \times S_{cu} \times l_m}{1000} = \frac{0,27 \times 328,9 \times 22,283}{1000} = 1,979 [kg] \quad (27)$$

Com $[S_{cu}] = mm^2$ e $[l_m] = cm$

Para a seção escolhida, a resistência linear aproximada é dada pela equação (28):

$$r_1 = r_2 = 0,026 \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (28)$$

B. Situação 2 - Considerando a capacidade do fio e desconsiderando a densidade de corrente na bobina:

Alguns dos resultados obtidos para a primeira situação serão utilizados aqui, visto que, a potência de projeto, o nível de tensão, a frequência e a densidade de fluxo magnético permanecem os mesmos, então, para o uso desses resultados, serão apenas destacadas as equações em que se encontram.

Para as dimensões do núcleo obtêm-se os mesmos valores já calculados em (13), (14) e (15). Como a lâmina é padronizada e não foi possível cortar, tem-se que a largura $a = 4cm$ e profundidade $b = 4cm$. Então, fixando $S_g = 16cm^2$, tem-se que $S_m = 14,545cm^2$.

O valor da tensão equivalente sobre cada bobina bem como os valores das correntes do primário e secundário e as seções do primário e secundário são os mesmos já calculados anteriormente em (16), (17), (18), (19) e (20), respectivamente.

Observando que a potência de 640 VA é para o carregamento máximo do dispositivo, as correntes calculadas também são para esse carregamento, assim, é possível escolher uma seção de condutor menor que ainda assim suporte as correntes calculadas, então, utiliza-se a mesma seção de 25 AWG: $s = 0,16mm^2$ escolhida em Oliveira (2016), que suporta entre 2 e 4A e, portanto, não compromete o funcionamento do filtro.

Como o cálculo realizado utiliza o mesmo valor de tensão de fase, o resultado do número de espiras é o mesmo encontrado na primeira situação na equação (21). Em relação a seção total do cobre, o valor será distinto do caso anterior por depender das seções escolhidas para os fios de cobre, logo, tem-se a equação (29) a seguir:

$$S_{cu} = N_1 \times s_1 + N_2 \times s_2 = 253 \times 0,16 + 253 \times 0,16 = 80,96 [mm^2] \quad (29)$$

A altura e largura da janela e o peso do ferro são os mesmos já mencionados em (23), (24) e (25), respectivamente. Assim, o comprimento médio da espira continua sendo o mesmo calculado em (26). A partir disso, calcula-se o peso total do cobre dado pela equação (30):

$$P_{cu} = \frac{0,27 \times S_{cu} \times l_m}{1000} = \frac{0,27 \times 80,96 \times 22,283}{1000} = 0,487 [kg] \quad (30)$$

Com $[S_{cu}] = mm^2$ e $[l_m] = cm$.

Para a seção escolhida, a resistência linear aproximada é dada pela equação (31):

$$r_1 = r_2 = 0,11 \left[\frac{\Omega}{m} \right] \quad (31)$$

3.2.3 Estimativas de Perdas

As perdas totais são calculadas somando as perdas do núcleo e do cobre em que, para o núcleo é necessário que se conheça a perda específica das lâminas utilizadas, como não foi possível encontrá-la, serão apenas estimadas as perdas do cobre para as duas situações.

As perdas totais no cobre são estimadas pela equação (32):

$$W_{cu} = 3 \times (N_1 \times l_m \times I_1^2 \times r_1 + N_2 \times l_m \times I_2^2 \times r_2) \quad (32)$$

1 Situação 1 - Considerando a capacidade de corrente no fio e a densidade de corrente da bobina

Utilizando a equação (32) e os resultados das equações (17), (18), (21), (26) e (28) estima-se que as perdas do cobre são dadas pela equação (33):

$$\begin{aligned} W_{cu} &= 3 \times (N_1 \times l_m \times I_1^2 \times r_1 + N_2 \times l_m \times I_2^2 \times r_2) = \\ &= 3 \times 253 \times 22,283 \times 10^{-2} \times 0,026(1,848^2 + 1,680^2) \cong 27,422 [W] \end{aligned} \quad (33)$$

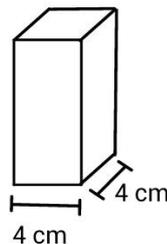
2 Situação 2 - Considerando a capacidade do fio e desconsiderando a densidade de corrente na bobina:

Utilizando a equação (32) e os resultados das equações (17), (18), (21), (26) e (31) estima-se que as perdas do cobre são dadas pela equação (34):

$$\begin{aligned} W_{cu} &= 3 \times (N_1 \times l_m \times I_1^2 \times r_1 + N_2 \times l_m \times I_2^2 \times r_2) = \\ &= 3 \times 253 \times 22,283 \times 10^{-2} \times 0,11(1,848^2 + 1,680^2) \cong 116,043 [W] \end{aligned} \quad (34)$$

A Figura 8 ilustra as dimensões de cada perna do filtro, com isso, é possível calcular o perímetro com os valores da sua largura e profundidade e, então, estimar o comprimento de cada espira, assim, o comprimento total do cobre em metros pode ser estimado.

Figura 8 – Dimensões de cada perna do filtro.



Fonte: Autor.

O comprimento de uma espira considerando o perímetro de uma seção transversal de uma perna do núcleo é dado pela equação (35):

$$l \cong 4 + 4 + 4 + 4 = 16 \text{ [cm/ espira]} = 0,16 \text{ [m/ espira]} \quad (35)$$

Sabendo que para ambas as situações se têm 253 espiras por bobina, o comprimento de fio de cobre para cada bobina é dado pela equação (36):

$$l' = 0,16 \times 253 = 40,48 \left[\frac{\text{m}}{\text{bobina}} \right] \quad (36)$$

Cabe aqui calcular também a resistência por bobina para o caso em que se considera a densidade de corrente, assim, tem-se a equação (37) a seguir:

$$r_{bobina} = l' \times r = 40,48 \times 0,026 = 1,052 \left[\frac{\Omega}{\text{bobina}} \right] \quad (37)$$

Levando em conta que a conexão elétrica do filtro contempla 2 bobinas, para cada fase temos então uma resistência dada pela equação (38):

$$2 \times 1,052 = 2,104 \text{ } [\Omega] \quad (38)$$

Para o cálculo do comprimento total do cobre, leva-se em consideração o filtro ser trifásico, logo, são seis bobinas no total com a mesma quantidade de espiras, assim, temos a equação (39):

$$l_T = 6 \times 40,48 = 242,88 \text{ [m]} \quad (39)$$

A Tabela 3 a seguir mostra de maneira mais organizada os resultados dos cálculos realizados para os dois casos em questão, o que possibilita uma análise de qual caso escolher para a otimização do filtro eletromagnético, avaliando os aspectos do aumento da eficiência e o custo necessário para isto.

Tabela 3 – Resultados para as diretrizes de projeto e para a bitola adotada em Oliveira (2016).

PARÂMETROS	Situação 1	Situação 2
Potência trifásica (VA)	640,000	640,000
Potência por fase (VA)	213,333	213,333
Nível de tensão de fase do primário (V)	127,000	127,000
Nível de tensão de fase do secundário (V)	127,000	127,000
Nível de tensão sobre cada bobina (V)	110,000	110,000
Frequência (Hz)	60,000	60,000
Seção magnética calculada (cm²)	14,142	14,142
Seção geométrica calculada (cm²)	15,556	15,556
Largura calculada (cm)	3,944	3,944
Largura real (cm)	4,000	4,000
Profundidade real (cm)	4,000	4,000
Seção geométrica fixa real (cm²)	16,000	16,000
Seção magnética real (cm²)	14,545	14,545
Corrente no primário (A)	1,848	1,848
Corrente no secundário (A)	1,680	1,680
Seção do primário (mm²)	0,616	0,616
Seção do secundário (mm²)	0,560	0,560
Seção escolhida para o primário (mm²)	0,650	0,160
Seção escolhida para o secundário (mm²)	0,650	0,160
Número de espiras do primário (espiras)	253,000	253,000
Número de espiras do secundário (espiras)	253,000	253,000
Seção total do cobre (mm²)	328,900	80,960
Altura da janela (cm)	10,000	10,000
Largura da janela (cm)	4,000	4,000
Peso do ferro (kg)	5,430	5,430
Comprimento da espira média (cm)	22,283	22,283
Comprimento total de cobre (m)	242,880	242,880
Peso do cobre (kg)	1,979	0,487
Resistência do primário (ohm/m)	0,026	0,110
Resistência do secundário (ohm/m)	0,026	0,110
Perdas do cobre (W)	27,422	116,043

Fonte: Autor.

É interessante fazer um comentário sobre a diferença nos valores das perdas do cobre com o cálculo da variação percentual dada pela equação (40) a seguir:

$$\Delta_w(\%) = \frac{(116,043 - 27,422)}{27,422} \times 100 = 323,175\% \quad (40)$$

Observa-se que do caso 1 para o caso 2 houve um aumento de 323,175% das perdas do cobre, como o comprimento do cobre é o mesmo, o que justifica esse aumento é a resistência

devido às seções diferentes, visto que o comprimento total do fio de cobre é o mesmo para ambas as situações e, sabendo que a resistência é inversamente proporcional à seção do fio, é esperado que o fio de menor seção tenha uma resistência total maior e, portanto, uma perda no cobre maior, que é justamente o que mostra a Tabela 3. Neste momento, fica evidente que a melhor proposta de otimização é fazendo a escolha do condutor de maior seção.

3.3 Análise visual

No que se refere a inspeção visual do filtro em seu estado atual, foram fotografadas algumas imagens capturando vários ângulos deste equipamento, que são apresentadas a seguir:

Figura 9 – Protótipo do filtro eletromagnético.



Fonte: Autor.

Figura 10 – Vista frontal.



Fonte: Autor.

Figura 11 – Visão traseira.



Fonte: Autor.

Figura 12 – Vista lateral direita.



Fonte: Autor.

Figura 13 – Vista lateral esquerda.



Fonte: Autor.

Figura 14 – Vista superior



Fonte: Autor.

As imagens do filtro sem o isolamento externo apresentam-se da seguinte maneira:

Figura 15 – Vista frontal sem isolamento externo.



Fonte: Autor.

Figura 16 – Vista lateral direita sem isolamento externo.



Fonte: Autor.

Figura 17 – Vista lateral esquerda sem isolamento externo.



Fonte: Autor.

Figura 18 - Vista traseira sem isolamento externo.



Fonte: Autor.

Como abordado em Oliveira (2016), este protótipo foi construído de acordo com os materiais acessíveis na época ao autor, assim, pelas imagens anteriores já é possível supor que uma melhoria nos materiais de isolamento poderá trazer algum benefício ao dispositivo. Além disso, os carretéis foram confeccionados com potes de sorvete de forma caseira como

apresentado em Oliveira (2016), o que permite destacar que pode ser obtido um aumento da eficiência do dispositivo, caso sejam utilizados carretéis com moldes justos e mais adequados às colunas do núcleo. Observando as figuras (15) a (18), é notório o problema de acoplamento das bobinas (mais evidenciados nas colunas adjacentes), muito disso se justifica devido o protótipo ter 5 anos desde sua construção, por já ter sido transportado de um laboratório para outro, entre outros fatores. Este problema da falta de acoplamento é um dos principais fatores de impacto no funcionamento do filtro eletromagnético de correntes de sequência-zero, conforme descrito na seção 2.2.

De acordo com as imagens, percebe-se que o filtro não possui uma base, acrescentá-la ao dispositivo seria bastante útil tanto para registrar suas especificações como para facilitar o seu transporte. Uma ideia adicional seria utilizar bornes para conectar a saída de cada uma das bobinas, permitindo assim que o usuário faça a ligação como desejar, fazendo uso da ligação zigue-zague para atuar como filtro ou utilizando de outras ligações para outros fins.

Outro ponto que é possível observar tanto em Oliveira (2016) como pela inspeção visual do filtro, é sobre o isolamento dos enrolamentos em que não foi utilizado verniz, logo, como esse isolante proporciona melhoria nas propriedades físicas reduzindo as tensões mecânicas entre os enrolamentos, ajuda a preencher os espaços entre as espiras, evita a fixação de umidade que é prejudicial às características elétricas (SCHIMIDT, 1979) entre outros fatores, a falta desse material influencia significativamente no desempenho do filtro. Portanto, com essa análise visual pode-se pressupor que seu funcionamento está comprometido e que de fato uma otimização do dispositivo é justificada.

3.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foi feito um estudo das formulações que norteiam o projeto do filtro eletromagnético. Foi realizada uma análise do projeto implementado em Oliveira (2016) e então uma checagem dos cálculos para verificação de possíveis pontos a serem otimizados. Neste sentido, a checagem dos cálculos para o filtro eletromagnético foi refeita considerando duas situações que se distinguem pela escolha da seção do fio de cobre, em que a primeira situação (considerando a capacidade de corrente do fio e a densidade de corrente da bobina) foi considerada a mais adequada para uma possível otimização. Estes resultados demonstraram que respeitando a capacidade do filtro e a densidade de corrente, a troca da seção do fio indicará um

importante fator para melhoria da eficiência no que diz respeito às perdas no cobre das bobinas e as perdas por dispersão.

Ademais, foi realizada uma inspeção visual das condições gerais do filtro em relação ao seu aspecto físico, sugerindo algumas alterações e adaptações que podem trazer benefícios ao seu exterior e ao seu desempenho. O próximo capítulo terá como objetivo mostrar simulações do filtro eletromagnético para validar o seu funcionamento.

4 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

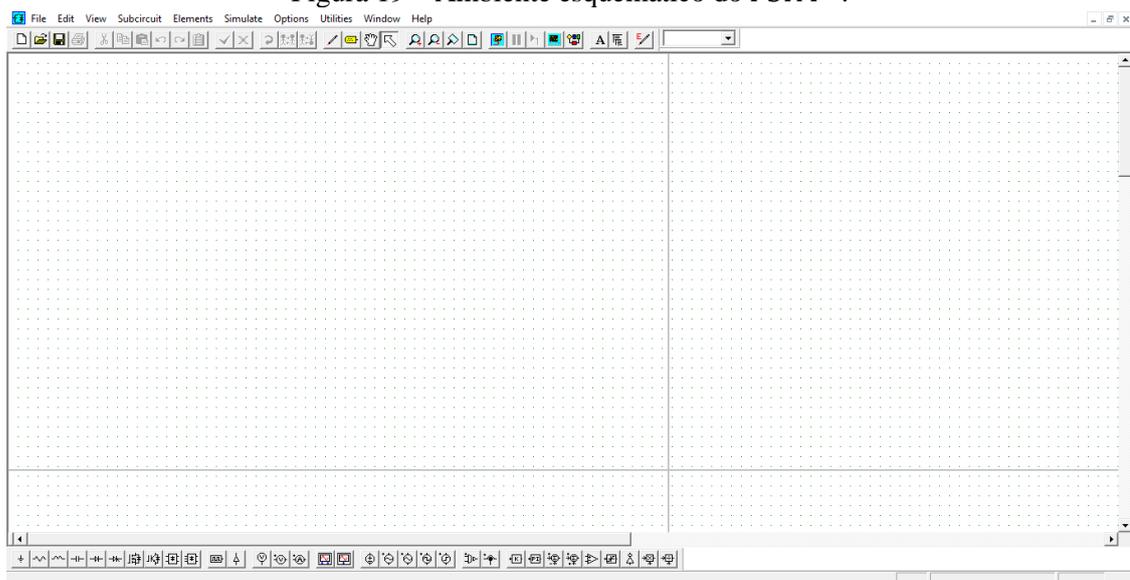
4.1 Considerações iniciais

Com o intuito de estimar a melhoria de desempenho alcançada pela proposta de otimização antes da reforma do preconizado protótipo, este capítulo se destina, por meio do *software PSIM*[®], expor os resultados de simulações da atuação do filtro em um sistema elétrico com cargas não lineares, observando sua performance tanto com a presença de cargas equilibradas como desequilibradas.

4.2 Sistema simulado

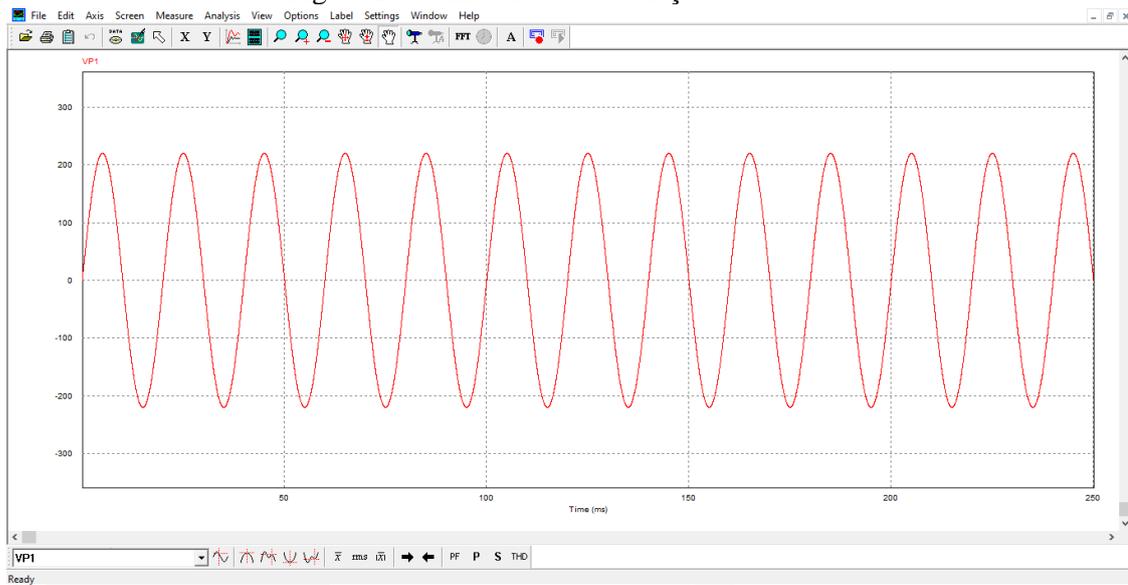
O *software* de simulação utilizado, como já mencionado, foi o *PSIM*[®] (em que pode ser baixada uma versão demo e também solicitada uma versão de teste de 30 dias pelo site Powersim, disponível nas referências), que se trata de um programa computacional desenvolvido para áreas como a eletrônica de potência, por exemplo. Apesar de ser uma ferramenta muito poderosa para simulações, esse *software* apresenta uma interface bastante intuitiva e amigável (Powersim Inc., 2020). As Figuras 19 e 20 a seguir ilustram o ambiente esquemático para os projetos bem como sua interface de simulações:

Figura 19 – Ambiente esquemático do *PSIM*[®].



Fonte: Autor.

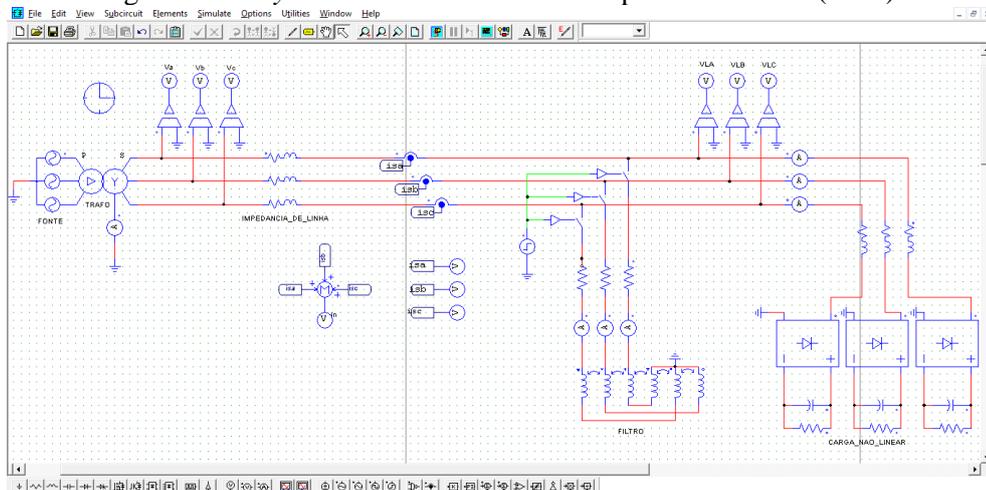
Figura 20 – Ambiente de simulação do *PSIM*[®].



Fonte: Autor.

Sua biblioteca de componentes é bastante ampla, o que permite o desenvolvimento de uma gama de circuitos para simulações. O tratamento que o programa tem em relação aos harmônicos em sistemas elétricos (permitindo visualizar gráficos no domínio da frequência, coletar dados de uma tabela gerada pelo próprio programa, fazer medições em pontos específicos dos sinais, entre outras ferramentas), torna-o ainda mais interessante de ser utilizado neste trabalho. Além do motivo citado anteriormente, a escolha do *PSIM*[®] para as simulações do filtro eletromagnético, também se deu devido à possibilidade de utilizar um *layout* adaptado do sistema simulado em Freitas (2014). A Figura 21 a seguir ilustra o *layout* do sistema simulado:

Figura 21 – *Layout* do sistema simulado adaptado de Freitas (2014).



Fonte: Adaptado de Freitas (2014).

No layout simulado, o filtro foi colocado com uma chave inicialmente aberta conectada ao sistema, de forma que o usuário possa escolher em que momento da simulação o filtro deve atuar. Para o caso, foi adicionada uma fonte degrau conectada às chaves por meio de um controlador liga-desliga que faz a conexão entre o circuito controlador e o de alimentação. Assim, mediante a fonte degrau, é possível estabelecer o tempo em que o filtro deve começar a atuar.

Em relação aos dados dos componentes presentes na Figura 21, tanto o trabalho de Freitas (2014) como o de Ravagnani (2008) foram tidos como base, sendo que em relação ao segundo, foram adaptados os valores das indutâncias próprias e mútuas do filtro. Os valores da Situação 1 da seção 3.2.2 foi utilizada para esta simulação, tendo em vista que foi a que apresentou mais benefícios teoricamente. Em relação aos valores das indutâncias das bobinas do filtro, foi adotado 180 [mH] para as indutâncias próprias, e 179,999 [mH] para as mútuas.

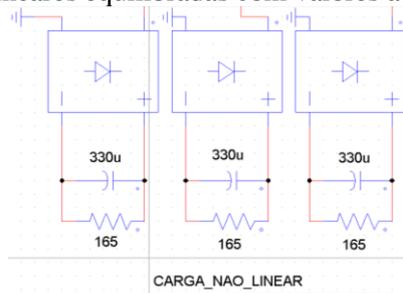
O nível de tensão utilizado na simulação foi o mesmo usado para os cálculos neste trabalho. Com relação aos valores das cargas não lineares e da impedância de linha, foram adotados os mesmos que em Ravagnani (2008). Já para a resistência das bobinas do filtro, foi utilizado o valor calculado na equação (38).

Os tópicos a seguir, ilustram por meio de gráficos e tabelas os resultados obtidos para simulações com cargas não lineares equilibradas e desequilibradas, sem filtragem e com filtragem, para que se possa estimar o impacto de atuação do filtro no sistema.

4.2.1 Sistema com cargas equilibradas

Como citado anteriormente, os valores de resistência e capacitância das cargas não lineares utilizados, foram os mesmos que em Ravagnani (2008), assim, mantendo os valores de capacitância (em Farad) e resistência (em ohms) para cada retificador, as cargas não lineares ficam equilibradas. A Figura 22 a seguir ilustra esses valores, em que se tem as fases A, B e C adotadas da direita para a esquerda.

Figura 22 – Cargas não lineares equilibradas com valores adaptados de Freitas (2014).

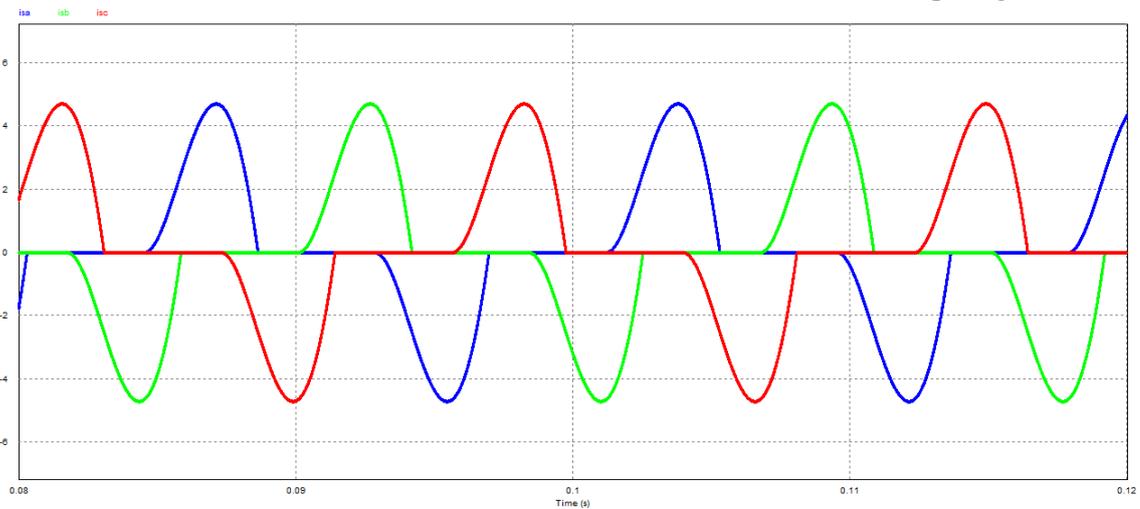


Fonte: Adaptado de Freitas (2014).

A. Sem filtragem

Sem a atuação do filtro e com as cargas equilibradas, tem-se a Figura 23 ilustrando o gráfico no domínio do tempo das correntes das fases A, B e C em regime permanente que estão fluindo pelo sistema:

Figura 23 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

A Tabela 4 apresenta os valores RMS das correntes das fases:

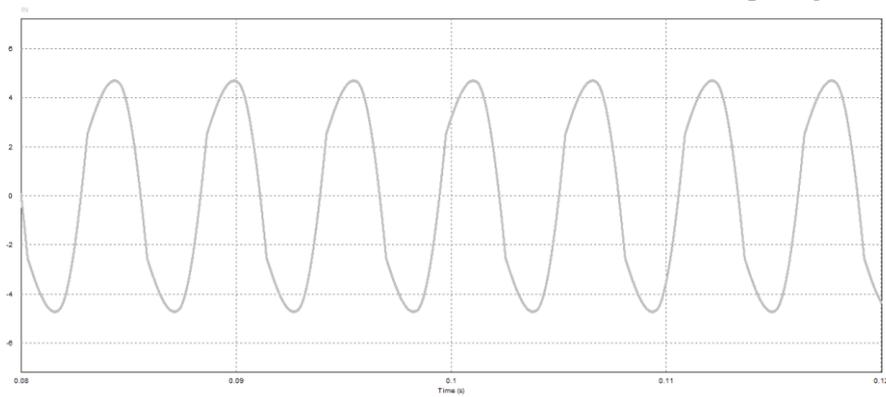
Tabela 4 – Correntes RMS das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas equilibradas

Correntes RMS [A]		
Fase A	Fase B	Fase C
2,192	2,192	2,192

Fonte: Autor.

Para o neutro do sistema, a Figura 24 ilustra seu gráfico no domínio do tempo:

Figura 24 – Forma de onda da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.

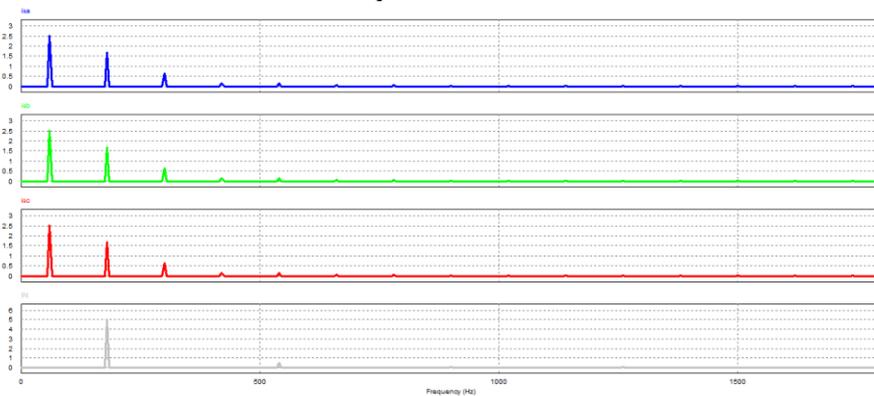


Fonte: Autor.

Com valor RMS de 3,557 [A].

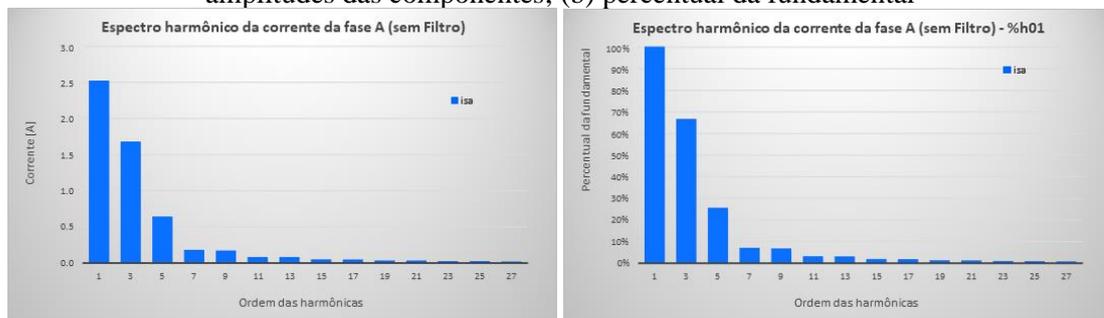
Analisando as correntes das fases e do neutro no domínio da frequência, obtém-se os gráficos e espectros harmônicos, ilustrados nas figuras 25 a 29.

Figura 25 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

Figura 26 – Espectro harmônico da corrente da fase A (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental

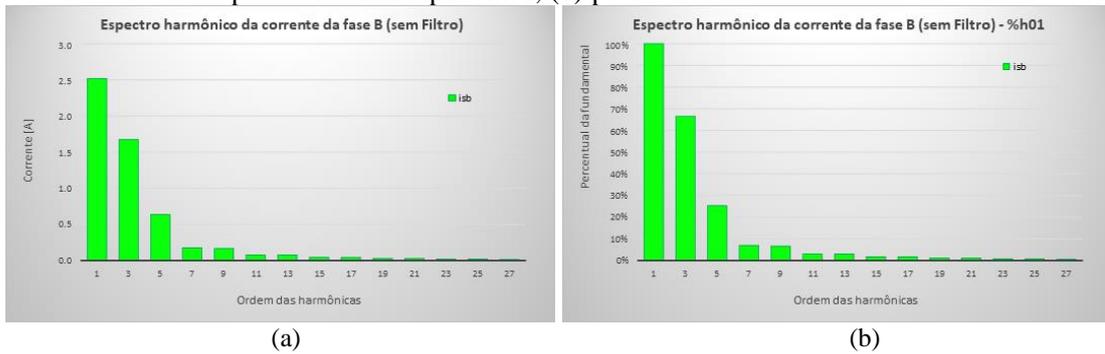


(a)

(b)

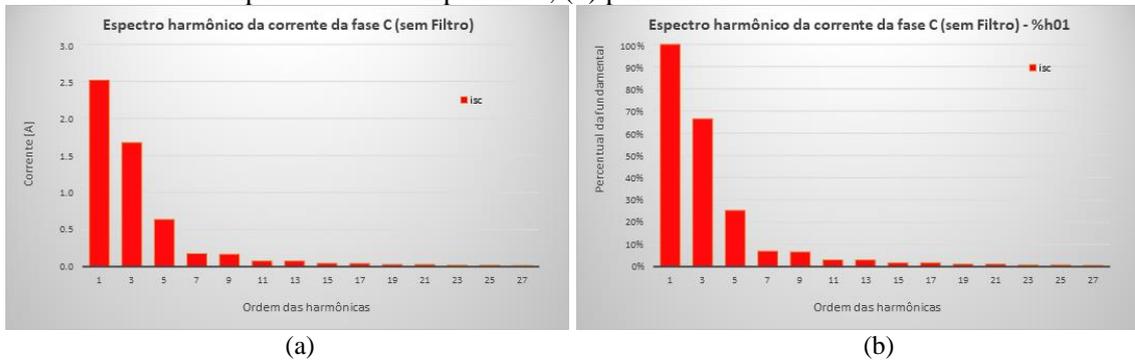
Fonte: Autor.

Figura 27 – Espectro harmônico da corrente da fase B (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental



Fonte: Autor.

Figura 28 – Espectro harmônico da corrente da fase C (sem Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental



Fonte: Autor.

A Tabela 5 e 6 apresentam uma descrição dos valores das fases e do neutro, respectivamente.

Tabela 5 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (sem Filtro) e com cargas equilibradas. (continua)

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	60	2,516	2,516	2,516	0	0	0	71,956	71,950	71,956
3	180	1,673	1,673	1,673	66,494	66,490	66,494			
5	300	0,636	0,636	0,636	25,267	25,261	25,267			
7	420	0,174	0,174	0,174	6,909	6,911	6,909			
9	540	0,165	0,165	0,165	6,562	6,562	6,562			
11	660	0,075	0,075	0,075	2,979	2,977	2,979			
13	780	0,074	0,074	0,074	2,932	2,932	2,932			
15	900	0,042	0,042	0,042	1,676	1,677	1,676			

Tabela 5 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (sem Filtro) e com cargas equilibradas. (conclusão)

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
17	1020	0,042	0,041	0,042	1,649	1,649	1,649			
19	1140	0,027	0,027	0,027	1,075	1,074	1,075			
21	1260	0,027	0,027	0,027	1,055	1,055	1,055			
23	1380	0,019	0,019	0,019	0,748	0,748	0,748			
25	1500	0,018	0,018	0,018	0,731	0,730	0,731			
27	1620	0,014	0,014	0,014	0,551	0,552	0,551			

Fonte: Autor.

Figura 29 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

Tabela 6 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas equilibradas.

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	60	0,000
3	180	5,019
5	300	0,000
7	420	0,000
9	540	0,495
11	660	0,000
13	780	0,000
15	900	0,127
17	1020	0,000
19	1140	0,000
21	1260	0,080
23	1380	0,000
25	1500	0,000
27	1620	0,042

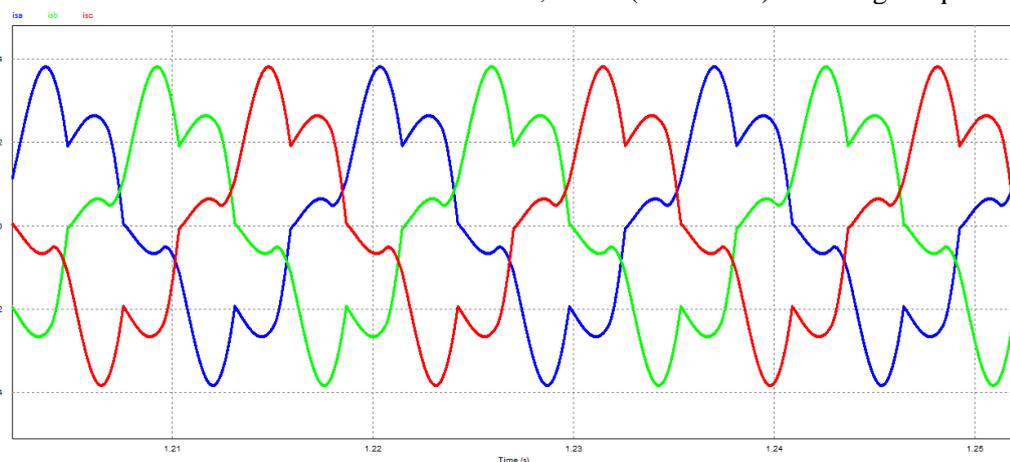
Fonte: Autor.

A partir das figuras e tabelas anteriores, é possível identificar que a taxa de distorção harmônica total é cerca de 72% com a presença de cargas não lineares para cada uma das fases, e a terceira harmônica ainda para as 3 fases tem a maior taxa de distorção harmônica individual de aproximadamente 65%. Como os estudos sugerem e de acordo com o que foi abordado neste trabalho com as devidas referências sobre o assunto, era esperado que o gráfico no domínio da frequência bem como o espectro harmônico da corrente do neutro apresentasse somente valores das harmônicas *triplens*, já que as correntes harmônicas de sequência zero são as que circulam no neutro. Assim, a alínea B a seguir irá ilustrar o impacto da presença no filtro eletromagnético no sistema com as cargas não lineares equilibradas.

B. Com filtragem

Adicionando o filtro eletromagnético ao sistema, obtém-se a Figura 30 ilustrando o gráfico no domínio do tempo das correntes das fases A, B e C em regime permanente:

Figura 30 - Formas de onda das correntes das fases A, B e C (com Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

A Tabela 7 apresenta os valores RMS das correntes de fase:

Tabela 7 - Correntes RMS das fases A, B e C (com Filtro) com cargas equilibradas.

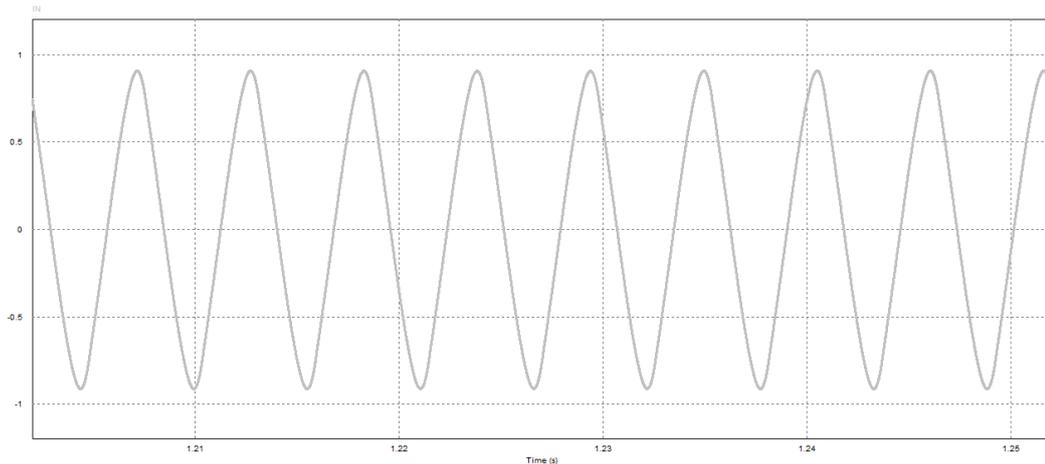
Correntes RMS [A]		
Fase A	Fase B	Fase C
2,198	2,198	2,198

Fonte: Autor.

Em relação a Figura 30, já é possível observar a atuação do filtro no sistema, pois agora a forma de onda das 3 fases se assemelha a uma senoide. Outra observação que pode ser feita, é que as correntes RMS ficaram mais equilibradas com a presença do filtro.

Para o neutro do sistema, a Figura 31 ilustra seu gráfico:

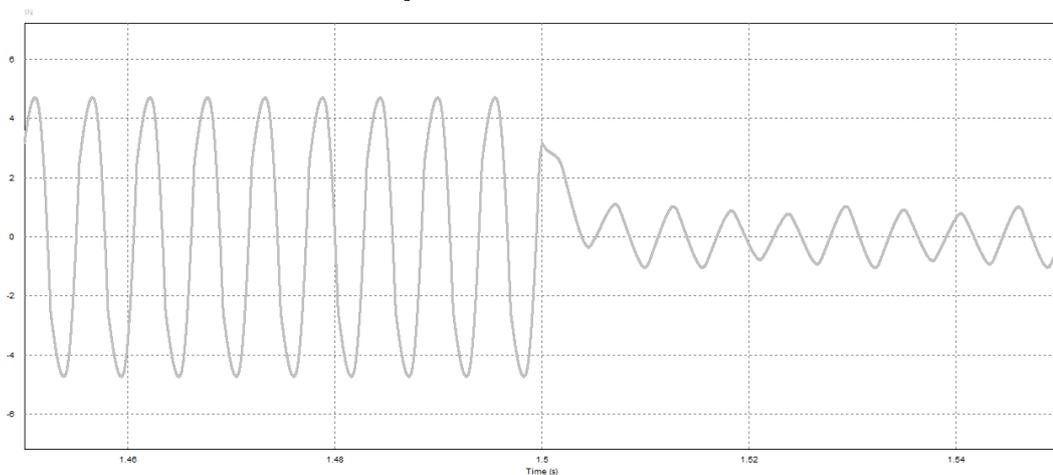
Figura 31 - Forma de onda da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

Observa-se que o valor RMS da corrente do neutro agora é de aproximadamente 0,608 [A]. Comparando com a corrente RMS do neutro sem o Filtro, percebe-se que houve uma diminuição drástica em seu valor. A Figura 32 a seguir ilustra uma simulação destacando o momento em que o filtro passa a atuar no sistema para ficar mais visível o impacto do dispositivo no caso em questão:

Figura 32 – Forma de onda da corrente do neutro com cargas equilibradas destacando o momento da inserção do Filtro no sistema.

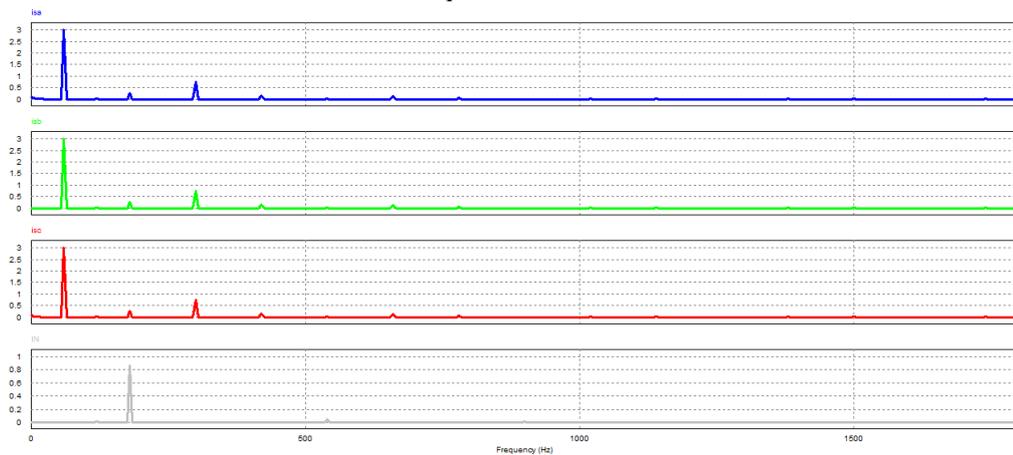


Fonte: Autor.

No tempo 1,5 [s] o Filtro passa a atuar diminuindo de forma bastante significativa a corrente do neutro, como esperado. Isto indica que o filtro está tendo o desempenho expectável em relação às harmônicas de sequência zero.

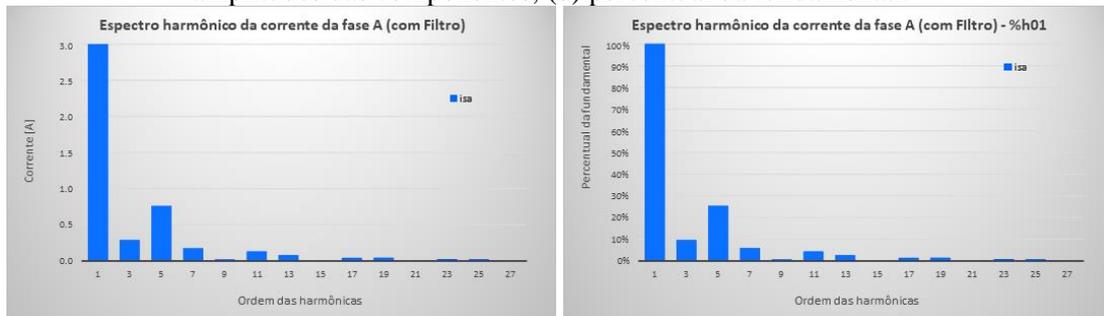
Analisando agora as correntes das fases e do neutro no domínio da frequência, obtém-se os seguintes gráficos e espectros harmônicos ilustrados nas Figuras 33 a 37:

Figura 33 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

Figura 34 – Espectro harmônico da corrente da fase A (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.

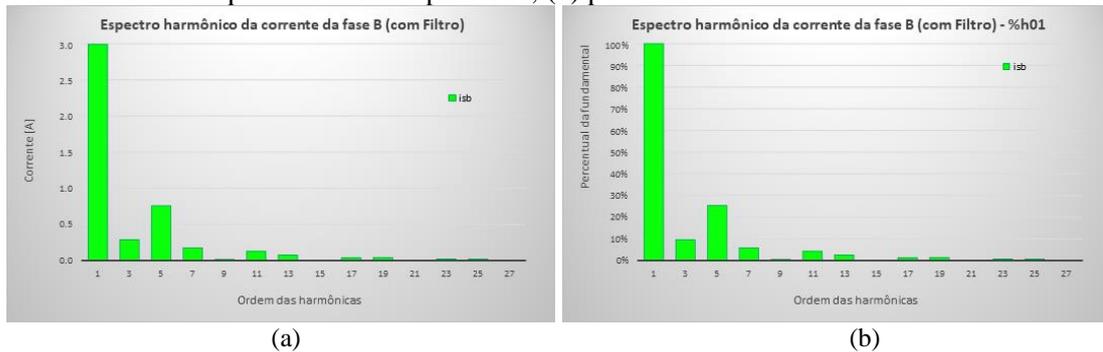


(a)

(b)

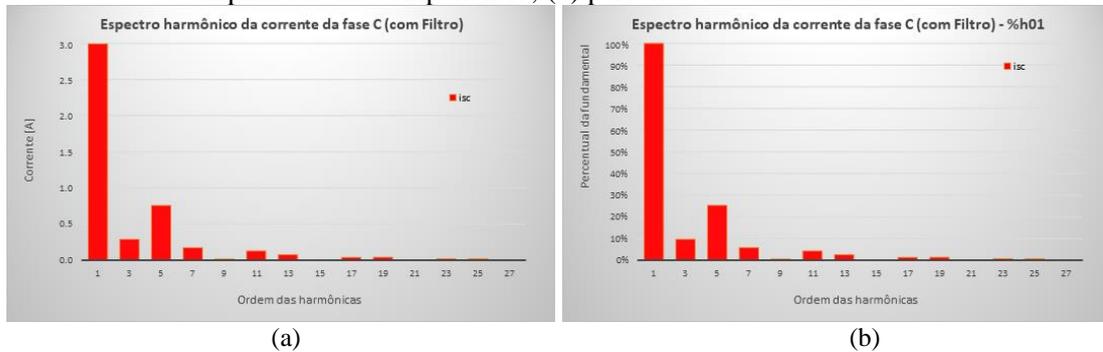
Fonte: Autor.

Figura 35 – Espectro harmônico da corrente da fase B (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.



Fonte: Autor.

Figura 36 – Espectro harmônico da corrente da fase C (com Filtro) com cargas equilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.



Fonte: Autor.

As Tabelas 8 e 9 apresentam uma descrição dos valores das fases e neutro, respectivamente.

Tabela 8 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (com Filtro) e com cargas equilibradas.

(continua)

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	60	2,995	2,991	2,993	0,000	0,000	0,000	28,419	28,203	28,433
3	180	0,284	0,287	0,287	9,496	9,582	9,605			
5	300	0,757	0,757	0,756	25,278	25,318	25,277			
7	420	0,172	0,172	0,172	5,736	5,759	5,732			
9	540	0,016	0,015	0,015	0,529	0,518	0,500			
11	660	0,127	0,127	0,127	4,226	4,231	4,230			
13	780	0,075	0,074	0,074	2,503	2,482	2,481			
15	900	0,004	0,004	0,003	0,124	0,120	0,114			
17	1020	0,037	0,037	0,037	1,251	1,243	1,250			

Tabela 8 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (com Filtro) e com cargas equilibradas.

(conclusão)

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
19	1140	0,039	0,039	0,039	1,303	1,302	1,309			
21	1260	0,001	0,001	0,001	0,026	0,035	0,039			
23	1380	0,019	0,019	0,019	0,649	0,650	0,645			
25	1500	0,018	0,018	0,018	0,607	0,617	0,610			
27	1620	0,001	0,000	0,000	0,017	0,016	0,015			

Fonte: Autor.

Figura 37 – Espectro harmônico da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.



Fonte: Autor.

Tabela 9 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (com Filtro) com cargas equilibradas.

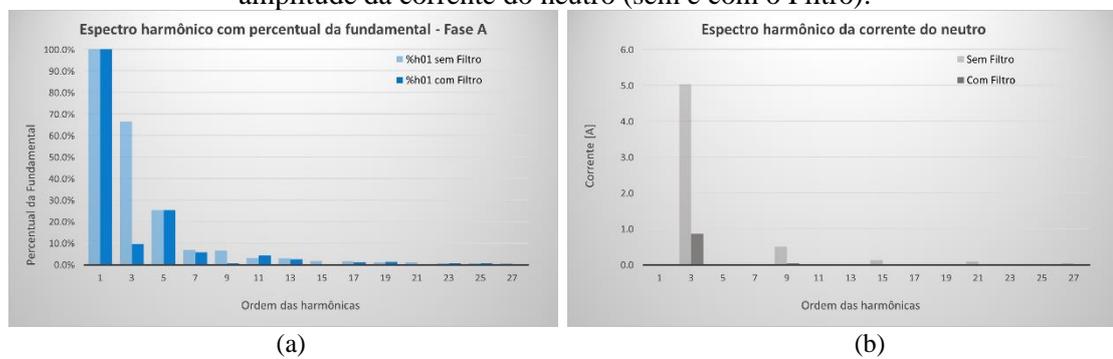
Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	60	0,000
3	180	0,858
5	300	0,000
7	420	0,000
9	540	0,046
11	660	0,000
13	780	0,000
15	900	0,011
17	1020	0,000
19	1140	0,000
21	1260	0,003
23	1380	0,000
25	1500	0,000
27	1620	0,001

Fonte: Autor.

Ao comparar os espectros harmônicos das Figuras 26 a 29 e 34 a 37 e os dados das Tabelas 5, 6, 8 e 9, fica nítido o funcionamento do filtro no sistema. Observa-se que a Distorção Harmônica Total reduziu em aproximadamente 61% (tomando como referência o THD sem Filtro) de um caso para o outro em relação às fases, e cerca de 83% em relação a amplitude da corrente RMS do neutro (de 5,063 [A] para 0,608 [A]). Observa-se que para as harmônicas de sequência zero, o filtro desempenha seu papel, pois exemplificando com o caso da harmônica de terceira ordem para a fase A, sua distorção harmônica individual diminuiu de 66,496% para 9,496%, ou seja, uma redução de 85,719% (tomando como referência o valor de distorção individual sem o Filtro) que equivale a 1,4 [A], assim, cerca de 1,4 [A] deixou de ser injetado na rede por esta harmônica devido à presença do filtro.

Outro dado que é relevante ser mencionado, é em relação ao neutro, que demonstra de forma expressiva a atuação do filtro eletromagnético reduzindo todas as harmônicas de sequência zero, um exemplo disso foi a redução de 4,161 [A] só em relação à harmônica de terceira ordem, o que exprime mais uma vez o ótimo funcionamento do dispositivo. As Figuras 38 (a) e 38 (b) a seguir ilustram às reduções resultantes da inserção do filtro no sistema:

Figura 38 – Espectro harmônico (a) percentual da fundamental da fase A (sem e com o Filtro); (b) amplitude da corrente do neutro (sem e com o Filtro).



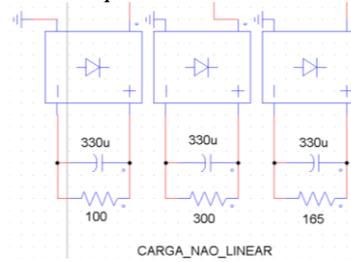
Fonte: Autor.

É interessante observar que apesar de um acréscimo sutil em algumas harmônicas de outras sequências, a redução que o dispositivo causa nas harmônicas de sequência zero é bem superior, assim, o filtro de fato atua para o que se desempenha.

4.2.2 Sistemas com cargas desequilibradas

Para a análise do funcionamento do filtro com cargas não lineares desequilibradas, os valores das resistências dos retificadores foram alterados como ilustra a Figura 39:

Figura 39 – Cargas não lineares desequilibradas com valores adaptados de Freitas (2014).

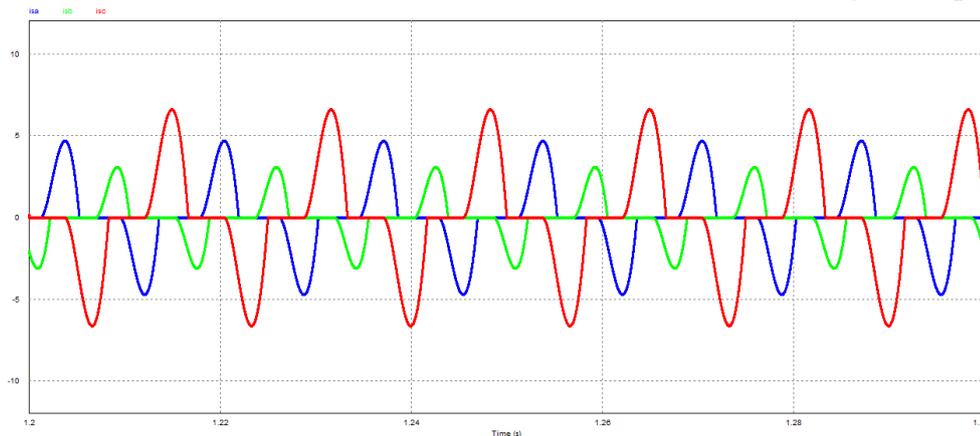


Fonte: Adaptado de Freitas (2014).

A. Sem filtragem

Sem a atuação do filtro e com as cargas desequilibradas, a Figura 40 ilustra o gráfico no domínio do tempo das correntes das fases A, B e C em regime permanente que estão fluindo pelo sistema:

Figura 40 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

A Tabela 10 apresenta os valores RMS das correntes das fases:

Tabela 10 – Correntes RMS das fases A, B e C (sem Filtro) com cargas desequilibradas

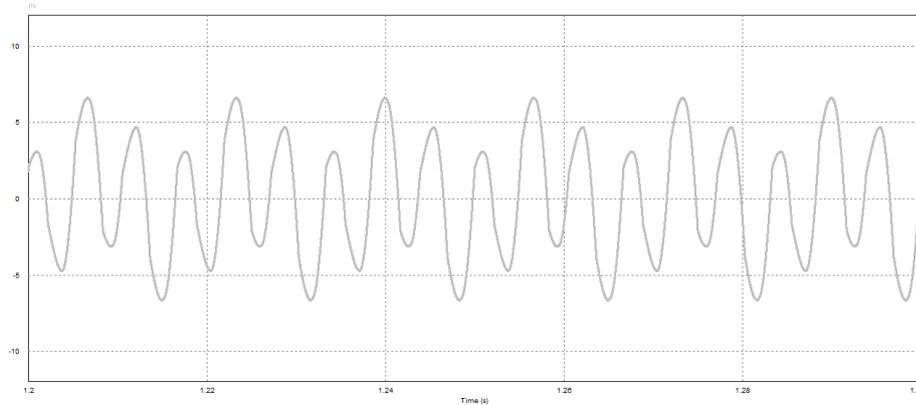
Correntes RMS [A]		
Fase A	Fase B	Fase C
2,192	1,346	3,263

Fonte: Autor.

A diferença entre os picos das formas de onda das correntes bem como de seus valores RMS era o esperado, tendo em vista que para cada fase há uma carga com valor de resistência diferente.

Para o neutro do sistema, a Figura 41 ilustra seu gráfico:

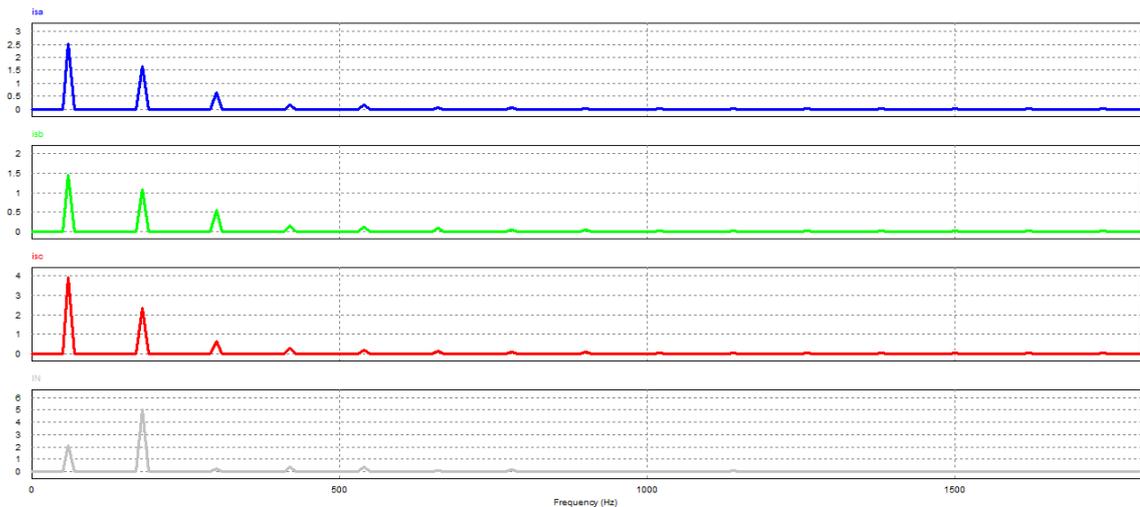
Figura 41 – Forma de onda da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

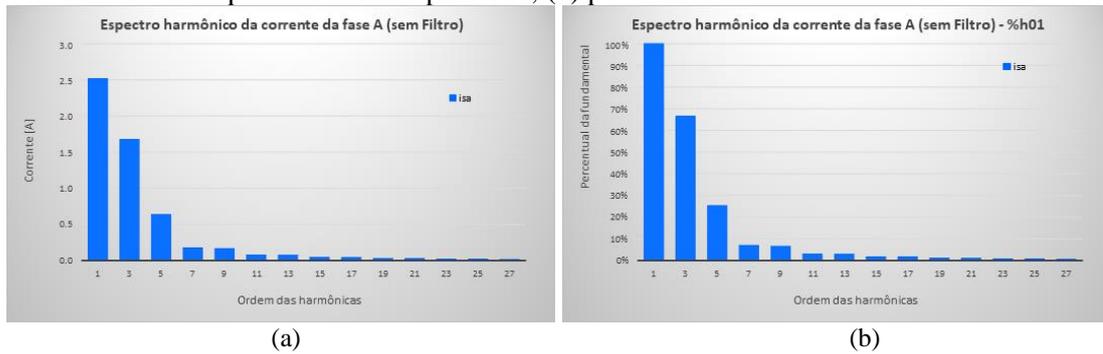
O valor RMS da corrente do neutro para esse caso é de 3,916 [A]. Observa-se que a mudança nas amplitudes no sinal da Figura 24 em comparação com a Figura 41, se dá devido ao desequilíbrio das cargas, assim, já se supõe que além das harmônicas de sequência zero, há a presença também das harmônicas de outras sequências na corrente do neutro. As Figuras 42 a 46 a seguir ilustram os resultados dos gráficos no domínio da frequência bem como os espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C e do neutro.

Figura 42 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

Figura 43 – Espectro harmônico da corrente da fase A (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.

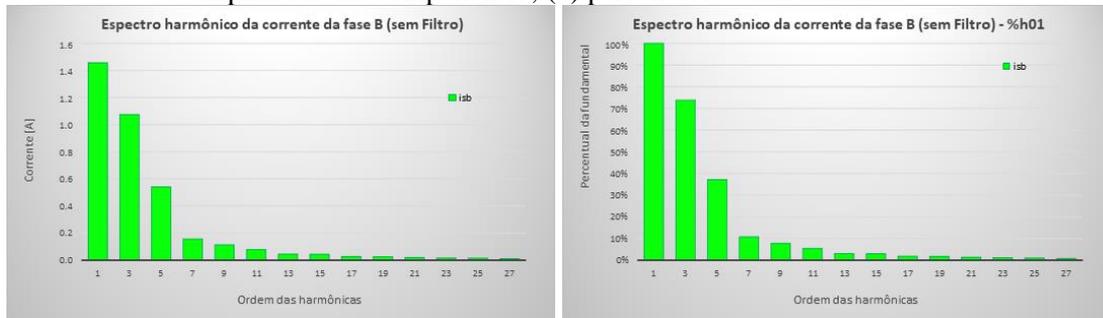


(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 44 – Espectro harmônico da corrente da fase B (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.

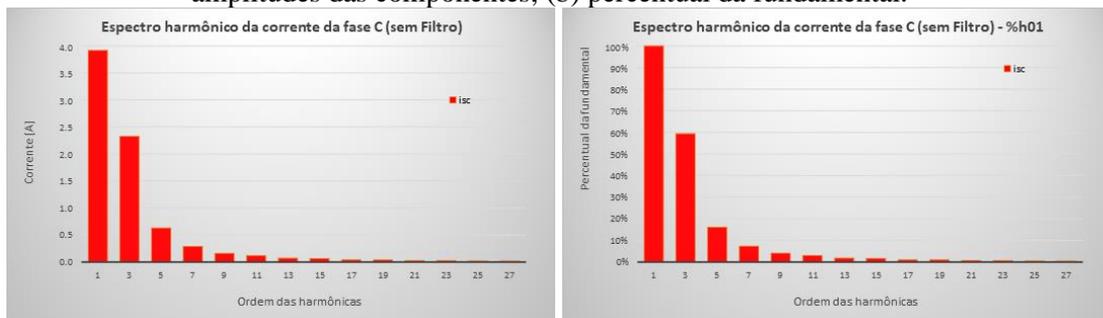


(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 45 – Espectro harmônico da corrente da fase C (sem Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

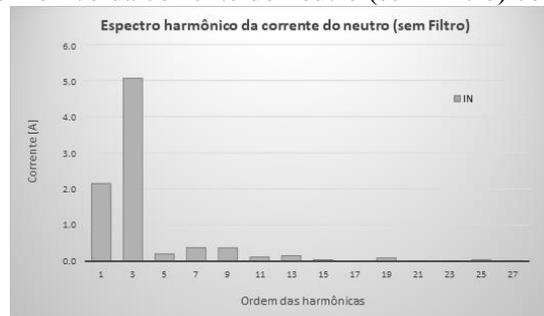
A Tabela 11 e 12 apresenta uma descrição dos valores das fases e do neutro, respectivamente:

Tabela 11 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (sem Filtro) e com cargas desequilibradas

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	60	2,517	1,457	3,917	0,000	0,000	0,000	72,023	83,999	62,245
3	180	1,676	1,075	2,326	66,573	73,786	59,386			
5	300	0,636	0,541	0,630	25,257	37,132	16,074			
7	420	0,174	0,156	0,288	6,908	10,703	7,342			
9	540	0,165	0,112	0,160	6,545	7,718	4,079			
11	660	0,075	0,078	0,118	2,977	5,387	3,022			
13	780	0,074	0,044	0,071	2,921	3,034	1,803			
15	900	0,042	0,043	0,064	1,674	2,961	1,639			
17	1020	0,042	0,026	0,040	1,649	1,806	1,032			
19	1140	0,027	0,025	0,039	1,076	1,728	1,007			
21	1260	0,027	0,019	0,027	1,053	1,296	0,693			
23	1380	0,019	0,016	0,026	0,747	1,078	0,664			
25	1500	0,018	0,014	0,020	0,730	0,981	0,511			
27	1620	0,014	0,011	0,018	0,551	0,743	0,462			

Fonte: Autor.

Figura 46 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

Tabela 12 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.

(continua)

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	60	2,150
3	180	5,063
5	300	0,200
7	420	0,373
9	540	0,371

Tabela 12 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (sem Filtro) com cargas desequilibradas.

(conclusão)

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
11	660	0,116
13	780	0,153
15	900	0,042
17	1020	0,007
19	1140	0,091
21	1260	0,012
23	1380	0,014
25	1500	0,046
27	1620	0,015

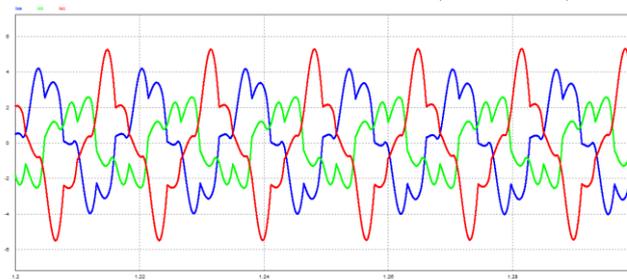
Fonte: Autor.

A diferença entre os valores das correntes harmônicas das fases é justificada devido à mudança nos valores das cargas como já mencionado. Era esperado que os valores em relação a fase A se mantivessem, pois causando essa assimetria entre as cargas, as componentes harmônicas de outras sequências passam a ter uma atuação mais nítida nas correntes das fases. A observação anterior também é perceptível no neutro, que faz com que além de outras componentes harmônicas, apareça também um valor de corrente fundamental resultante justamente da assimetria entre as correntes de fase. A alínea B a seguir ilustra o desempenho do filtro nesse caso de cargas não lineares desequilibradas.

B. Com filtragem

Com a inserção do filtro, a Figura 47 ilustra o gráfico no domínio do tempo das correntes das fases A, B e C em regime permanente que estão fluindo pelo sistema:

Figura 47 – Formas de onda das correntes das fases A, B e C (com Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

A Tabela 13 apresenta os valores RMS das correntes das fases:

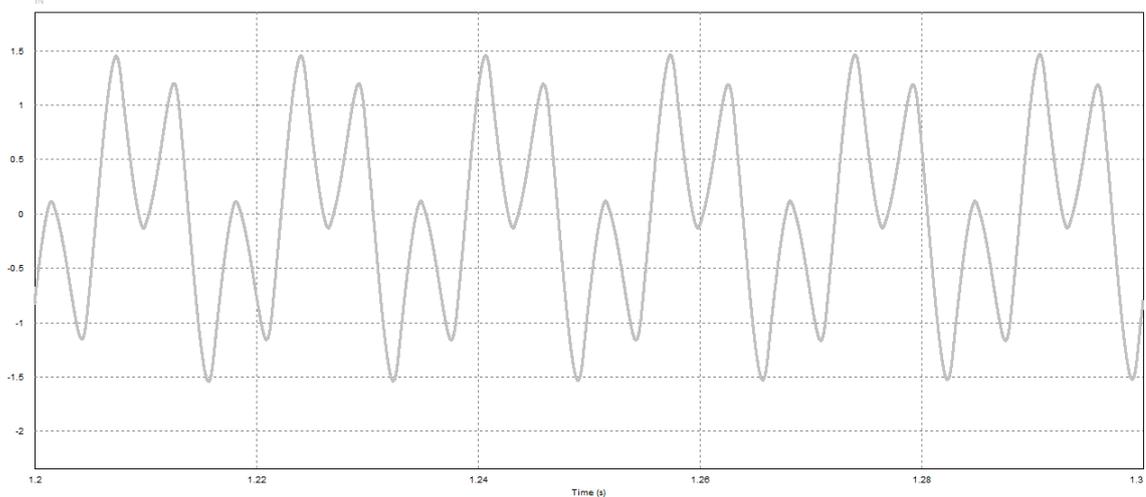
Tabela 13 – Correntes RMS das fases A, B e C (com Filtro) com cargas desequilibradas.

Corrente RMS [A]		
Fase A	Fase B	Fase C
2,494	1,665	2,839

Fonte: Autor.

Apesar da diferença entre as amplitudes das correntes, observa-se mais uma vez a tendência senoidal que os sinais apresentam devido à presença do filtro. Já em relação a corrente de neutro, a Figura 48 ilustra seu gráfico no domínio do tempo:

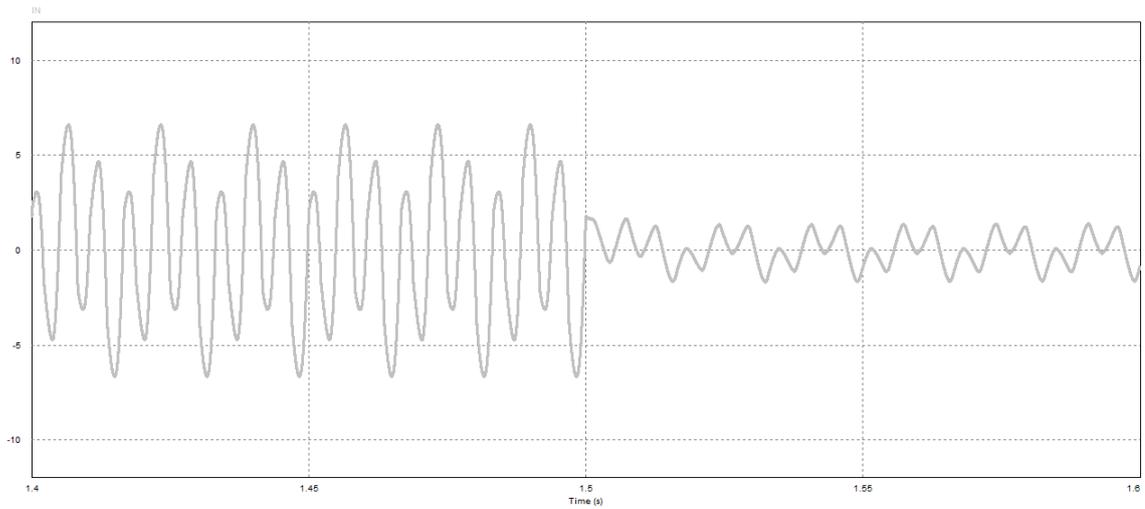
Figura 48 - Forma de onda da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

Em que o valor RMS da corrente do neutro é de 0,818 [A], em que comparando com a simulação sem filtro, tem-se mais uma vez uma redução drástica no seu valor. A Figura 49 a seguir ilustra a diferença da corrente do neutro sem e com a atuação do filtro:

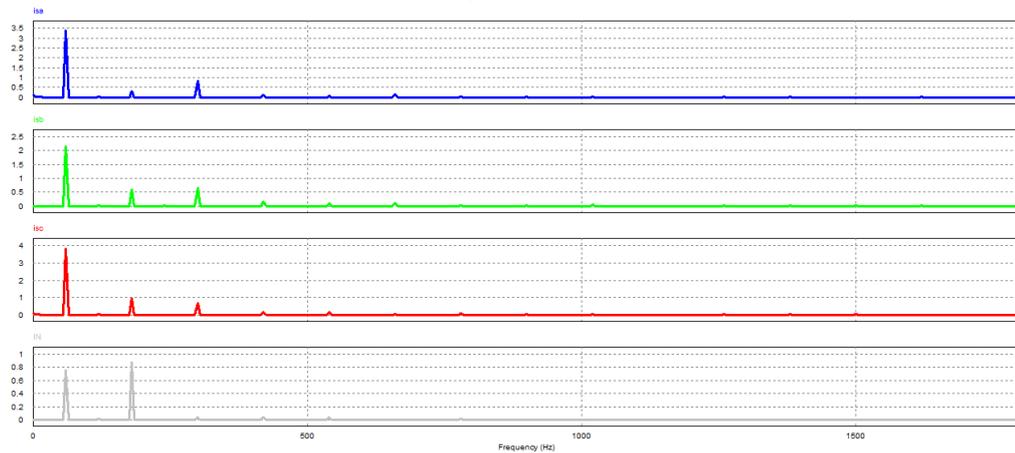
Figura 49 – Forma de onda da corrente do neutro com cargas desequilibradas destacando o momento da inserção do Filtro no sistema.



Fonte: Autor.

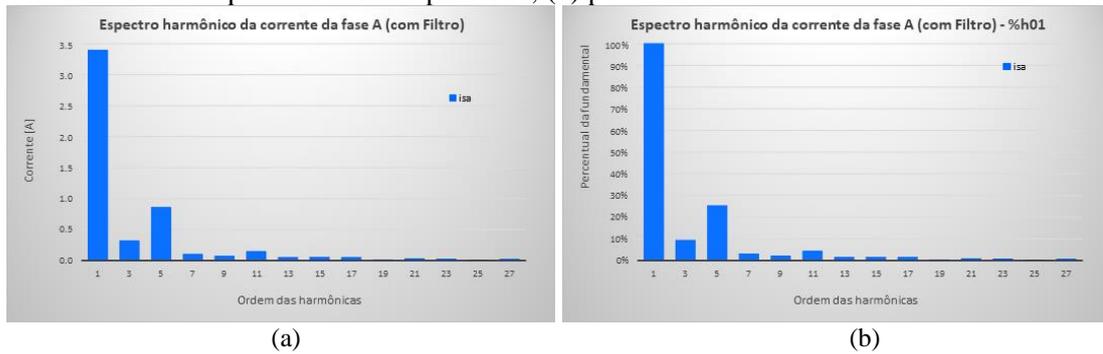
Assim, a figura anterior deixa nítido mais uma vez o desempenho do filtro na redução da corrente do neutro. As Figuras 50 a 54 a seguir ilustram os resultados no domínio da frequência e os espectros harmônicos das fases e do neutro para este caso com a atuação do filtro:

Figura 50 – Gráficos no domínio da frequência das fases A, B, C e do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

Figura 51 – Espectro harmônico da corrente da fase A (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.

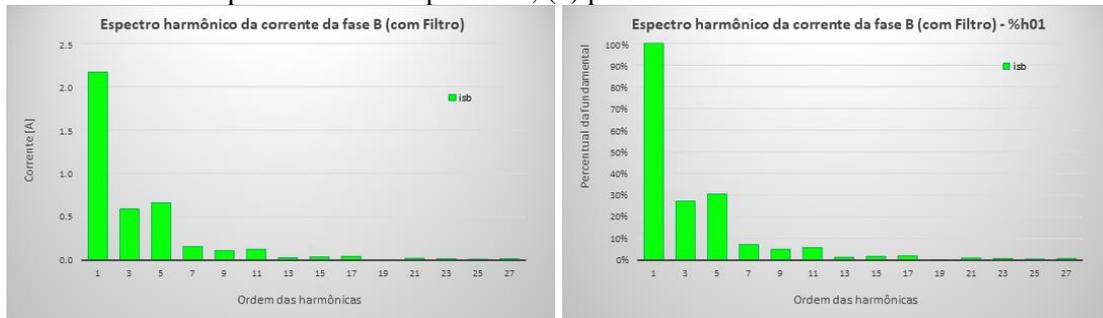


(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 52 – Espectro harmônico da corrente da fase B (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.

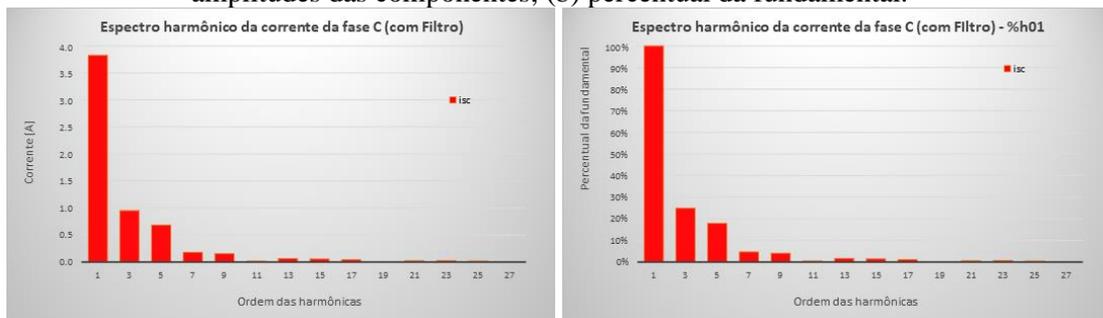


(a)

(b)

Fonte: Autor.

Figura 53 – Espectro harmônico da corrente da fase C (com Filtro) com cargas desequilibradas: (a) amplitudes das componentes; (b) percentual da fundamental.



(a)

(b)

Fonte: Autor.

A Tabela 14 e 15 apresenta uma descrição dos valores das fases e do neutro, respectivamente:

Tabela 14 – Dados das distorções harmônicas das fases A, B e C (com Filtro) e com cargas desequilibradas

Ordem	Frequência (Hz)	Correntes (A)			Distorção harmônica individual (%)			THD (%)		
		Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C	Fase A	Fase B	Fase C
1	60	3,394	2,169	3,827	0,000	0,000	0,000	27,815	42,337	31,558
3	180	0,315	0,590	0,953	9,284	27,223	24,907			
5	300	0,856	0,661	0,684	25,212	30,488	17,887			
7	420	0,100	0,156	0,180	2,938	7,174	4,694			
9	540	0,068	0,108	0,156	2,011	4,989	4,065			
11	660	0,145	0,124	0,019	4,271	5,739	0,490			
13	780	0,048	0,029	0,063	1,404	1,330	1,656			
15	900	0,049	0,037	0,056	1,454	1,699	1,469			
17	1020	0,048	0,043	0,043	1,421	1,976	1,112			
19	1140	0,009	0,004	0,003	0,256	0,196	0,075			
21	1260	0,027	0,021	0,024	0,808	0,964	0,623			
23	1380	0,022	0,016	0,027	0,652	0,737	0,700			
25	1500	0,007	0,011	0,017	0,198	0,509	0,455			
27	1620	0,020	0,016	0,005	0,599	0,740	0,137			

Fonte: Autor.

Figura 54 – Espectro harmônico da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.



Fonte: Autor.

Tabela 15 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.

(continua)

Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
1	60	0,752
3	180	0,875
5	300	0,042
7	420	0,045
9	540	0,036

Tabela 15 – Dados das distorções harmônicas da corrente do neutro (com Filtro) com cargas desequilibradas.

(conclusão)

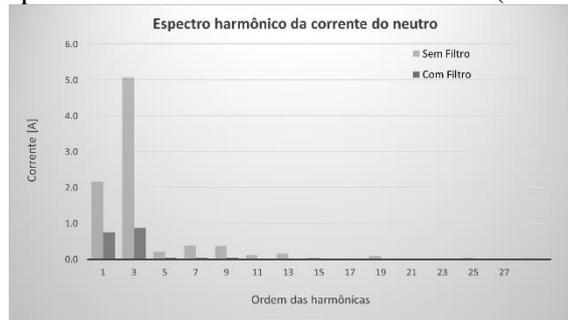
Ordem	Frequência (Hz)	Corrente (A)
11	660	0,006
13	780	0,013
15	900	0,004
17	1020	0,002
19	1140	0,004
21	1260	0,001
23	1380	0,001
25	1500	0,001
27	1620	0,000

Fonte: Autor.

Ao comparar os dados obtidos com a simulação com cargas desequilibradas, observa-se que o filtro continua desempenhando seu papel. Para as fases A, B e C houve uma redução na distorção harmônica total de aproximadamente 61,38%, 49,6% e 49,3% (tomando como referência o valor THD sem o Filtro), respectivamente, em que as reduções ocorreram de forma bem significativa na harmônica de terceira ordem (porém, é perceptível também nas outras componentes harmônicas de sequência zero, observando a redução dos valores das distorções individuais), o que demonstra mais uma vez que o filtro também tem um ótimo desempenho para situações em que as cargas estão desequilibradas.

Como já mencionado, o neutro apresenta uma redução drástica em seu valor de corrente, justificado justamente pela redução das componentes harmônicas de sequência zero devido à presença do filtro. Em relação a harmônica de terceira ordem houve uma redução de aproximadamente 83% (de 5,03 [A] para 0,875 [A], tomando como referência o valor sem o Filtro), que representa cerca de 4,2 [A] que não está mais circulando pelo neutro devido à harmônica de terceira ordem, o que demonstra um ótimo desempenho do dispositivo visto o estado do sistema com cargas desequilibradas. Para tornar mais evidente o impacto no neutro para esse caso, A Figura 55 ilustra o gráfico que exprime as duas situações do espectro harmônico do neutro para este caso de cargas desequilibradas:

Figura 55 – Espectro harmônico da corrente do neutro (sem e com o Filtro).



Fonte: Autor.

4.3 Considerações finais

Neste capítulo, foi verificado por meio de simulações utilizando o software PSIM, o desempenho de filtragem do filtro eletromagnético de correntes de sequência zero. Como mencionado nesta seção, os valores de indutância das bobinas do filtro adotados no software de simulação não são completamente fiéis à realidade, tendo em vista não ter sido possível encontrar uma maneira de calculá-las. No entanto, os valores utilizados foram relativamente adequados para o uso nestas simulações, uma vez que foram definidos tendo como base projetos de outros trabalhos, logo, é expectável que o desempenho do filtro pós-otimizado utilizando das diretrizes apresentadas no capítulo 3 seja tão eficiente quanto os resultados das simulações. Para este capítulo, foram consideradas duas situações: sistema com cargas não lineares equilibradas e sistema com cargas não lineares desequilibradas, a fim de verificar o comportamento do dispositivo.

Os resultados mostraram com clareza o seu desempenho no que diz respeito às duas situações, para ambas, o filtro foi capaz de reduzir drasticamente às correntes harmônicas de sequência zero, mostrando uma ótima eficiência na redução da corrente de neutro, trazendo os benefícios esperados da sua atuação num sistema elétrico. Assim, este capítulo se propôs a ilustrar os resultados expectáveis de uma possível otimização do projeto de Oliveira (2016).

5 CONCLUSÃO

O presente estudo objetivou apresentar uma proposta de revisão e melhoria no projeto e construção de um filtro eletromagnético de sequência zero, onde, em um primeiro momento, visando estabelecer procedimentos que norteiem o projeto, foram abordados os conceitos e fundamentos a respeito das componentes harmônicas, dando ênfase nas de terceira ordem e seus múltiplos e do dispositivo utilizado para a drenagem das mesmas. Foi destacada também, a necessidade da inserção desse tipo de dispositivo no sistema elétrico ou em conjunto de equipamentos, ressaltando os efeitos causados por esses harmônicos tanto no sistema elétrico em si quanto em equipamentos elétricos, como por exemplo, motores e transformadores.

De acordo com o resultado da modelagem matemática do filtro, constata-se que o principal parâmetro de influência na eficiência do dispositivo é o fator de acoplamento magnético das bobinas de uma mesma coluna, visto que quanto melhor for esse acoplamento (quanto mais próximos forem os valores das indutâncias próprias das bobinas em relação à indutância mútua dessas mesmas bobinas), menor será a impedância de sequência zero, implicando em uma melhor filtragem das harmônicas “*triplens*” pelo filtro. Diante disso, foi averiguado também sobre o comportamento das correntes de sequência zero geradas por cargas não lineares na presença de um filtro eletromagnético conectado em paralelo ao sistema supridor, verificando que de fato a relação do desvio do fluxo para o filtro depende fortemente do quão menor é a sua impedância intrínseca em relação à impedância do sistema supridor.

Como abordado no presente trabalho, a implementação de um filtro eletromagnético de sequência zero é feita de maneira análoga a de projetos de transformadores trifásicos, assim, foram revisados os cálculos efetuados por Oliveira (2016) tendo como base o Livro “Transformadores” de Afonso Martignoni, e então foram discutidos alguns parâmetros que poderiam ser melhorados, como aumentar a potência de projeto e considerar a densidade de corrente. A partir disso, foi então elaborada uma proposta de otimização do dispositivo por meio das diretrizes do projeto.

Nesse sentido, para tais diretrizes, os cálculos para o filtro eletromagnético foram refeitos considerando duas situações que se distinguem pela escolha da seção do fio de cobre. Notou-se que a diferença entre as perdas no cobre foi bastante considerável de um caso para o outro, o que permitiu concluir que, ao aumentar a seção do cobre para o tamanho adequado de acordo com o calculado na alínea A da seção 3.2.2, pôde-se notar elevado potencial de aumento do desempenho do filtro.

Como abordado neste trabalho, o principal elemento que determina um ótimo desempenho do filtro eletromagnético é o seu fator de acoplamento, assim, ao verificar o estado atual das bobinas do dispositivo no capítulo da análise visual, inferiu-se que nas condições atuais, o equipamento poderá apresentar baixo desempenho na filtragem das harmônicas. Ainda, foi possível destacar alguns outros aspectos que podem ser melhorados no dispositivo, como os materiais usados para sua isolação externa e entre as bobinas, e o uso de verniz para melhorar o isolamento entre as espiras. Além disso, foram feitas sugestões de adaptações em relação ao aspecto físico do equipamento, visando facilitar o seu transporte e viabilizar seu uso para outras finalidades.

No que diz respeito à validação da proposta de otimização do filtro eletromagnético por meio de simulações, o capítulo 4 apresentou resultados bastante eficientes em relação à filtragem das correntes harmônicas de sequência zero em um sistema com cargas não lineares equilibradas e desequilibradas, principalmente por evidenciar o impacto do dispositivo em relação a redução da corrente do neutro. Foi possível observar que houve um certo aumento de componentes harmônicas de outras sequências com a inserção do filtro no sistema, no entanto, esse aumento é sutil se comparado à drenagem das harmônicas de sequência zero. Assim, de modo geral, como mostra a Tabela 16 a seguir, as taxas de distorções harmônicas de sequência zero reduziram de forma bem expressiva, constatando o ótimo desempenho do modelo simulado.

Tabela 16 – Resumo dos valores de THD das fases e da corrente do neutro.

		THD (%)			Corrente h_{03} (A)	Corrente h_{01} (A)
		Fase A	Fase B	Fase C	Neutro	
Cargas Equilibradas	Sem Filtro	71,056	71,950	71,956	5,019	0
	Com Filtro	28,419	28,203	28,433	0,858	0
Cargas Desequilibradas	Sem Filtro	72,023	83,999	62,245	5,063	2,150
	Com Filtro	27,815	42,337	31,558	0,875	0,752

Fonte: Autor.

É importante ressaltar que para uma futura otimização do protótipo projetado em Oliveira (2016), os parâmetros irão apresentar valores relativamente diferentes em relação aos parâmetros usados nas simulações (pois foram apenas estimados e aproximados), no entanto,

com os resultados já obtidos, principalmente em relação a redução das perdas, é esperado que o filtro pós-otimizado apresente resultados tão bons quanto os simulados.

Em suma, no presente estudo, algumas contribuições podem ser destacadas. Entre elas, elencam-se como as principais:

- A exposição de conhecimentos relacionados à mitigação das componentes harmônicas de sequência zero utilizando filtros eletromagnéticos;
- O estudo, a análise e elaboração de uma proposta de otimização de um filtro eletromagnético;
- A apresentação de resultados simulados de um modelo do filtro eletromagnético.

Como propostas de seguimento do estudo aqui realizado, têm-se:

- Implementação das diretrizes e critérios de otimização elaboradas a partir do projeto implementado em Oliveira (2016);
- A incorporação de filtros sintonizados em frequências distintas das harmônicas de sequência zero;
- A inclusão de um bloqueador eletromagnético em ambiente de simulação digital para atuação conjunta com o filtro eletromagnético.

REFERÊNCIAS

APOLONIO, R.; DE OLIVEIRA, J. C.; DE VASCONCELLOS, A. B. Three-phase electromagnetic filter for zero sequence harmonics. In: **2004 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power (IEEE Cat. No. 04EX951)**. IEEE, New York, p. 613-618, 2004. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/1409423>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

BELCHIOR, F. N. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicas através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14325>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

BELCHIOR, F. N.; FERREIRA, J. F. V.; OLIVEIRA, J. C.; BERNARDES, V. A.; OLIVEIRA, L. C. O. Zero sequence electromagnetic filter performance with non ideal conditions. In: **2006 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power**, IEEE, Cascais, Portugal, p.1-6, 2006.

BUZO, R. F. **Dispositivos eletromagnéticos para confinamento de sequência zero: dimensionamento e projeto**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/139550>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

D'ÁVILA FILHO, R. C., BRAGA, M. F., SILVA, S. M. Aplicação de filtros ativos e passivos de potência: Estudo de caso. In: **VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais**, Poços de Caldas 2008. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Sidelmo-Silva/publication/228409316_APLICACAO_DE_FILTROS_ATIVOS_E_PASSIVOS_DE_POTENCIA_ESTUDO_DE_CASO/links/5559cecd08aeaaff3bf9c44f/APLICACAO-DE-FILTROS-ATIVOS-E-PASSIVOS-DE-POTENCIA-ESTUDO-DE-CASO.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

DAHONO, P. A.; WIDJAYA, R. E.; MARSI, S.; QAMARUZZAMAN. A Practical Approach to Minimize the Zero Sequence Current Harmonics in Power Distribution Systems. In: Proceedings of Power Conversion Conference - PCC '97, **IEEE Xplore digital library**, Nagaoka, Japan, p. 683-686, 2002. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/638278>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

ELETRIC VALE. **Tabela awg c/ bitola equivalente no padrão métrico**. Disponível em: <<http://eletricvale.com.br/pdf/05.pdf>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

FIGUEREDO, D. G. **Análise de Fourier e equações diferenciais parciais**. 2. ed. Rio de Janeiro: IMPA/CNPq, 1986. 274 p.

FREITAS, S. C. L. **Estudos teóricos e experimentais da operação conjunta de um supressor eletromagnético e de um filtro ativo de potência**. 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/111136>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

FREITAS, S. C. L. **Supressor Eletromagnético de Componentes Harmônicas de Sequência Zero**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87124>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

GARCIA, F. R.; NAVES, A. C. **Harmônicos em Sistemas Elétricos de Potência**. IESA/Capacitores INEPAR, 2008. Disponível em: <http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosePCap.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda., 2013. 376 p.

MANTOVANI, W. A. **Utilização de Redes Neurais Recorrentes na Caracterização de Cargas Não Lineares em Sistemas Elétricos**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87109>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

MARTIGNONI, A. **Transformadores**. 8. ed. São Paulo: Editora Globo, 1991. 301 p.

McLYMAN, C. W. T. **Transformer and inductor design handbook**. 3. ed. New York: CRC Press, 2004. 556 p.

OLIVEIRA, L. C. O.; FREITAS, S. C. L.; SOUZA, J. B.; OLIVEIRA, J. C. Modeling for performance analysis of electromagnetic zero-sequence suppressor. In: Proceedings of 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010, **IEEE Xplore digital library**, Bergamo, Italy, p. 1-8, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/5625338>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

OLIVEIRA, M. H. G. **Filtro de sequência zero - Estudos teóricos, projeto, simulação e implementação**. 2016. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas, 2016.

PIRES, I. A. Capítulo xii-medidas de mitigação de harmônicos. **Revista O Setor Elétrico**, São Paulo, v. 1, n. 59, p. 38-47, 2010. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br/wp-content/uploads/2011/01/ed59_fasc_harmonicosePCapXII.pdf>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

Powersim Inc. **PSIM: Download Demo**. Disponível em: <<https://powersimtech.com/products/psim/psim-pricing-and-licensing/download-demo/>>. Acesso em: 31 de março de 2021.

Powersim Inc. **PSIM User's Guide**. Rockville: Powersim Inc, 2020. Disponível em: <<https://www.powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>>. Acesso em: 31 de março de 2021.

RAVAGNANI, L. L. **Dimensionamento de filtro eletromagnético de sequência zero e ensaios experimentais**. Ilha Solteira: FE/Universidade Estadual Paulista- UNESP, 2007. 46p. Estudos especiais realizados junto ao programa de pós-graduação em engenharia elétrica.

RAVAGNANI, L. L. **Sistemas híbridos para mitigação de harmônicos: modelagem e estudos experimentais**. 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Ilha Solteira, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/handle/11449/100312>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

RIBEIRO, E. **Filtros ativos série para compensação de harmônicas de tensão**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/85123>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

SCHIMIDT, W. **Materiais Elétricos: Isolantes e Magnéticos**. 2. ed. rev. São Paulo – SP: Editora Blucher, 1979, v. 2, 176 p.

SILVA, N. **Contribuições ao Estudo, Projeto e Aplicação de Filtros Ativos Híbridos de Potência**. 2012. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Campinas – Unicamp, São Paulo, 2012. Disponível em: <<http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/260365>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.

VENDRAMINI, J. F. **Uma nova abordagem à filtragem de harmônicos de sequência zero através de dispositivos eletromagnéticos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006. Disponível em: <<http://repositorio.ufu.br/handle/123456789/14445>>. Acesso em: 27 de maio de 2020.