

MARCO AURÉLIO QUADROS

**FILTRAGEM PASSIVA DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES
ELÉTRICAS**

**FLORIANÓPOLIS
1999**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**FILTRAGEM PASSIVA DE HARMÔNICOS EM
INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa Catarina
como parte dos requisitos para a
obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Marco Aurélio Quadros

Florianópolis, Dezembro de 1999.

FILTRAGEM PASSIVA DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Marco Aurélio Quadros

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência e aprovada em sua forma final pelo Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’



Ênio Valmor Kassick, Dr.
Orientador



Ildemar Cassana Decker, D.Sc
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Ênio Valmor Kassick, Dr.
Presidente



Alexandre Ferrari de Souza, Dr.



João Carlos dos Santos Fagundes, Dr.

A Deus

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo, pela força que me impulsiona em viver todos os momentos de minha vida, iluminando meu caminho e dando-me sabedoria para desenvolver todos os meus projetos de vida.

Aos meus pais, Roberto Dorval Quadros e Marli Terezinha Baltazar Quadros, os quais sempre estiveram junto comigo em todos os momentos de minha vida. Sem a sua presença e sua força jamais poderia conquistar todos os meus objetivos e tornar este trabalho possível.

À toda a minha família pela ajuda e empenho, em especial a meu irmão Luciano Quadros, que sempre esteve comigo em todos os momentos.

Aos colegas de mestrado, os quais colaboraram de modo especial no decorrer de todo o curso, tornando-se parte importante no desenvolvimento deste trabalho.

Em especial aos professores Ênio Valmor Kassick, meu orientador, que sempre acreditou em minha potencialidade de trabalho, dando-me liberdade de ação e colaborando em todos os momentos decisivamente para o completo êxito do trabalho; e ao professor Arnaldo José Perin, que me incentivou desde meu curso de graduação a ingressar na área de eletrônica de potência, a quem devo muito respeito, admiração e profunda gratidão.

À Tatiana Silva, minha namorada, pela atenção, carinho e compreensão a mim dedicados durante o decorrer do trabalho.

À meus amigo Guilherme Arioli pela ajuda na montagem experimental.

À secretária do INEP, Patrícia, e aos demais funcionários da instituição.

À Universidade Federal de Santa Catarina e a CAPES, pelo apoio financeiro recebido no primeiro ano de meu curso de mestrado. Ao ONS pela ajuda na liberação incondicional e incentivo para o completo êxito deste trabalho.

BIOGRAFIA DO AUTOR

MARCO AURÉLIO QUADROS nasceu em Florianópolis, SC, no dia 20 de Novembro de 1974. Coursou o 2º grau no Colégio Catarinense, concluindo o mesmo em 1992. Prestou vestibular em 1993 na Universidade Federal de Santa Catarina, sendo aprovado para o Curso de Engenharia Elétrica. Foi monitor por duas vezes da disciplina de Eletrônica de Potência I, realizando ao final do curso estágio de longa duração na empresa Multibrás S.A, sediada em Joinville, SC. Concluiu seu curso no segundo semestre de 1997. No primeiro semestre de 1998 ingressou no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, nível de mestrado. Após concluído o primeiro ano do curso, ingressou na empresa ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico, atuando na área de Pós-Operação, onde trabalha atualmente.

SUMÁRIO

SUMÁRIO

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

RESUMO

ABSTRACT

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 2 – O FILTRO SHUNT SINTONIZADO.....	9
2.1 – Introdução.....	9
2.2 – Características Gerais do Filtro Shunt Sintonizado.....	9
2.3 – Variações de Parâmetros e sua Influência na Resposta de um Filtro Shunt Sintonizado.....	13
2.3.1 – Variação de L_{sh} e C_{sh} de um Filtro Shunt Sintonizado.....	13
2.3.2 – Variação de R_{sh} de um Filtro Shunt Sintonizado.....	16
2.4 – Associação em Paralelo de Filtros Shunt Sintonizados em Diferentes Frequências.....	17
2.5 – Variação de L_{sh} e C_{sh} de Filtros Shunt Sintonizados em Paralelo.....	18
2.6 – Projeto Clássico de Filtros Shunt Sintonizados.....	25
2.7 – Projeto de Filtros Shunt Sintonizados Utilizando Nova Metodologia.....	29
2.8 – Conclusão.....	35
CAPÍTULO 3 – FILTROS DE BLOQUEIO.....	36
3.1 – Introdução.....	36
3.2 – Filtros de Bloqueio Paralelo.....	36
3.2.1 – Variação dos Valores de L_{bp} e C_{bp} do Filtro de Bloqueio Paralelo.....	41
3.2.2 – Variação do Valor de R_{bp} do Filtro de Bloqueio Paralelo.....	43
3.2.3 – Métodos para Aplicação do Filtro de Bloqueio Paralelo.....	44
3.2.3.1 – O Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase.....	44
3.2.3.2 – O Filtro de Bloqueio Paralelo de Neutro.....	46
3.2.4 – Projeto de Filtros de Bloqueio Paralelo.....	47
3.3 – Filtro de Bloqueio Série.....	49
3.3.1 – Princípio de Funcionamento.....	49

3.3.2 – Caracterização do Filtro de Bloqueio Série.....	52
3.3.3 – Variação dos Valores de L_{bs} , C_{bs} e R_{bs} do Filtro de Bloqueio Série.....	54
3.3.4 – Possibilidades de Utilização do Filtro de Bloqueio Série.....	56
3.4 – Conceito de Célula de Bloqueio.....	58
3.5 – Conclusão.....	62
CAPÍTULO 4 – PROJETO E SIMULAÇÃO DE FILTROS DE BLOQUEIO	
PARALELO.....	63
4.1 – Introdução.....	63
4.2 – Caracterização de uma Instalação Elétrica Comercial.....	63
4.3 – Carga Típica de uma Instalação Elétrica Comercial.....	65
4.4 – Variação de Parâmetros de um Retificador Monofásico com Filtro Capacitivo (RMFC).....	67
4.4.1 – Variação do Valor de C_{RMFC}	68
4.4.2 – Variação do Valor de L_{RMFC}	69
4.4.3 – Variação do Valor de R_{RMFC}	70
4.4.4 – Considerações para Variação de Parâmetros de um RMFC.....	71
4.5 – Caracterização e Modelagem de Sistemas Elétricos Comercias.....	73
4.5.1 – Modelo de um Sistema Trifásico com Cargas Monofásicas Totalmente Equilibradas.....	74
4.5.2 – Modelo de um Sistema Trifásico Composto por Cargas Monofásicas de Elevado Desequilíbrio Harmônico.....	76
4.5.3 – Modelo de um Sistema Trifásico Real.....	78
4.6 – Projeto e Simulação de Células de Filtragem para Sistemas Comerciais.....	80
4.6.1 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado.....	81
4.6.2 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado e Filtro de Bloqueio de Neutro.....	86
4.6.3 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado, Filtro de Bloqueio de Neutro e Filtro de Bloqueio de Fase.....	90
4.6.4 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado e Dois Filtros de Bloqueio de Fase.....	93
4.6.5 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado, Dois Filtros de Bloqueio de Fase e um Filtro de Bloqueio de Neutro.....	97

4.7 – Conclusão.....	99
CAPÍTULO 5 – VERIFICAÇÃO PRÁTICA – BANCADA DE ESTUDOS.....	100
5.1 – Objetivo da Bancada de Estudos.....	100
5.2 – Layout do Projeto da Bancada de Testes.....	100
5.3 – Resultados Obtidos para Carga Equilibrada.....	103
5.4 – Comentários sobre os Resultados Finais.....	116
CONCLUSÕES FINAIS.....	118
APÊNDICE I	
APÊNDICE II	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

SIMBOLOGIA E ABREVIATURAS

ϕ	Ângulo de defasagem entre a tensão fundamental e a corrente fundamental
FP	Fator de potência
FD	Fator de deslocamento
TDH	Taxa de distorção harmônica
I_n	Corrente harmônica de ordem “n”
I_1	Corrente Fundamental
I_{SC}	Corrente de curto-circuito
I_L	Corrente máxima da instalação elétrica
L_{SH}	Indutância do filtro shunt sintonizado
C_{SH}	Capacitância do filtro shunt sintonizado
R_{SH}	Resistência do filtro shunt sintonizado
ω_0	Frequência de ressonância de um filtro shunt sintonizado (rad/s)
f_0	Frequência de ressonância de um filtro shunt sintonizado (Hz)
Z_F	Impedância de um filtro shunt sintonizado
L_{AMPL}	Indutância equivalente na frequência de amplificação
C_{AMPL}	Capacitância equivalente na frequência de amplificação
R_{AMPL}	Resistência equivalente na frequência de amplificação
Z_{AMPL}	Impedância equivalente na frequência de amplificação
ω_{AMPL}	Frequência de amplificação (rad/s)
f_{AMPL}	Frequência de amplificação (Hz)
Q	Fator de qualidade de um filtro shunt sintonizado
Q_{REAT}	Potência reativa
V_{ef}	Tensão Eficaz
I_{ef}	Corrente eficaz
C_{bs}	Capacitância do filtro de bloqueio série

L_{bs}	Indutância do filtro de bloqueio série
R_{bs}	Resistência do filtro de bloqueio série
Z_{bs}	Impedância do filtro de bloqueio série
ω_{bs}	Frequência de ressonância do filtro de bloqueio série (rad/s)
f_{bs}	Frequência de ressonância do filtro de bloqueio série (Hz)
RMFC	Retificador monofásico com filtro capacitivo
C_{RMFC}	Capacitância de um retificador monofásico com filtro capacitivo
L_{RMFC}	Indutância de um retificador monofásico com filtro capacitivo
R_{RMFC}	Resistência de um retificador monofásico com filtro capacitivo
V_{in}	Tensão de alimentação
t_c	Tempo de condução de um diodo
V_c	Tensão sobre o capacitor do retificador monofásico com filtro capacitivo
ΔV	Variação de tensão
R_R	Carga puramente resistiva
L_L	Indutância de uma carga genérica
R_L	Resistência de uma carga genérica
R_S	Resistência equivalente da dispersão de um transformador
L_S	Indutância equivalente da dispersão de um transformador
L_{bp}	Indutância de um filtro de bloqueio paralelo
R_{bp}	Resistência de um filtro de bloqueio paralelo
C_{bp}	Capacitância de um filtro de bloqueio paralelo
Z_{bp}	Impedância de um filtro de bloqueio paralelo
ω_{bp}	Frequência de ressonância de um filtro de bloqueio paralelo (rad/s)

Resumo da Dissertação apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

FILTRAGEM PASSIVA DE HARMÔNICOS EM INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Marco Aurélio Quadros

Dezembro/1999

Orientador: Ênio Valmor Kassick

Área de Concentração: Eletrônica de Potência

Palavras-chave: Filtros de Bloqueio, Harmônicas, Filtragem Passiva

Número de Páginas: 119

Este trabalho apresenta um novo estudo na área de filtragem passiva de harmônicos, introduzindo o uso de novos elementos, denominados filtros de bloqueio.

Estes novos filtros contribuem com o desempenho da filtragem tradicional, criando criando uma elevada impedância no caminho da harmônica, através da fase ou no neutro do sistema. Os filtros de bloqueio podem ser usados em qualquer sistema elétrico, especialmente em sistema comerciais de baixa tensão, onde a terceira harmônica está presente.

Será apresentada a estrutura básica dos filtros de bloqueio e shunt, tão bem como aspectos de seus projetos. Além disso, serão apresentados os resultados da variação de componentes e suas repostas em frequência.

Baseado em resultados de simulação, uma nova bancada de teste prática é desenvolvida, para implementar a técnica dos filtros de bloqueio.

Ao longo deste trabalho foram incluídas análises teóricas, equacionamentos matemáticos, procedimentos de projeto e resultados de experimentação para os filtros estudados.

Abstract of Dissertation presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

PASSIVE HARMONIC FILTERING IN ELETRIC INSTALATIONS

Marco Aurélio Quadros

December/1999

Advisor: Ênio Valmor Kassick

Area of Concentration: Power Electronics

Keywords: blocked filters, harmonics, passive filtering

Number of Pages: 119

EXEMPLO DE ABSTRACT:

This work presents a new approach to solve problems related to harmonic passive filtering, introducing the use of new elements, called blocked filters.

These new filters improve the traditional filtering performance, creating a high impedance in the path of harmonic, through the line phases or the neutral point of the electrical system. The blocked filters can be used in any kind of electrical system, especially in low voltage commercial system, where third harmonic is present.

It will be shown the basic structure of the blocked and shunt filters, as well as the main aspects considered in their projects. Furthermore, it will be presented the results of the components changes and their frequency response.

Based on the simulation results, a new practice laboratory test is developed, to introduce the blocked filters technique.

In the scope of this work, theoretical analysis, mathematical model, design procedure and experimental results of the proposed filters are included.

Capítulo 1 – Introdução Geral

Na última década, com o crescimento da eletrônica de potência, houve grande aumento no número de equipamentos elétricos e eletrônicos que aplicam a tecnologia de conversão de energia baseada no uso de semicondutores, sejam estes controlados ou não-controlados. Este avanço deu-se tanto em âmbito industrial, quanto no âmbito residencial e comercial. A inserção desta tecnologia em diversos equipamentos, resultando na presença de cargas não-lineares, trouxe grandes benefícios, dos quais pode-se destacar:

- Redução de custos de produção
- Redução de peso e volume
- Redução do consumo energético
- Melhoria significativa de desempenho

Juntamente com todas as vantagens acima citadas, houve também o acréscimo de algumas desvantagens ocasionadas por esta tecnologia, tais como :

- Interferência eletromagnética
- Ruídos audíveis
- Inserção de correntes harmônicas e deformação da tensão da rede elétrica

Entre estes problemas citados, os ruídos audíveis advindos de comutações em baixa frequência já possuem soluções técnicas bem implementadas atualmente.

A interferência eletromagnética apresenta-se como o mais novo problema encontrado nos equipamentos que utilizam a tecnologia de eletrônica de potência. Muitos esforços estão sendo feitos para determinar as fontes precisas deste fenômeno e de procurar técnicas de resolvê-los.

A inserção de correntes harmônicas pela presença de cargas não-lineares na rede de alimentação e a deformação da forma de onda da tensão são problemas que relacionam-se entre si, sendo que estas apresentam-se como fonte de extrema preocupação para os engenheiros que estudam a qualidade da energia elétrica nos últimos anos. Este também foi o ponto principal de partida do trabalho que será apresentado.

Atualmente salientou-se a necessidade de obter-se qualidade em todos os produtos e serviços ofertados, seja por empresas privadas ou públicas. O mercado de energia elétrica brasileiro atravessa um instante de transição. Parte-se da concepção de um bem público oferecido à população, para o de um produto de consumo oferecido por empresas privadas. Para tanto a garantia de qualidade torna-se elemento essencial na busca do atendimento das necessidades de mercado, ou seja, as necessidades dos clientes. Dentre as qualidades a serem asseguradas na energia entregue aos consumidores destacam-se o nível de tensão, a frequência e forma de onda. A frequência e o nível de tensão são elementos regulados pela operação do sistema elétrico de potência, que trata de manter a frequência da rede elétrica em torno de 60 Hz, com um desvio máximo de 0,06 Hz, e com um nível de tensão em torno de 1,0 pu (unidade básica referente ao valor nominal) com desvio máximo de 10%. Já a forma de onda da tensão e da corrente são grandezas que somente foram tornando-se fruto de preocupações devido aos problemas acarretados pelo uso de equipamentos que aplicam a tecnologia da eletrônica de potência, dentre os quais pode-se destacar: redução do fator de potência, carregamentos excessivos em equipamentos, perdas adicionais em transformadores e linhas de transmissão, mau funcionamento de equipamentos industriais, mau funcionamento de proteções, entre outros. Foram criadas então normas que tratam de regulamentar o nível das componentes harmônicas que cada consumidor poderia inserir na rede elétrica, ou seja, tentou-se limitar o grau de “poluição harmônica” aceitável por parte de cada consumidor.

As componentes harmônicas além de acarretarem todos os problemas já citados deterioram o fator de potência da instalação, uma vez que as mesmas representam energia reativa, aumentando a potência aparente do sistema, sem aumento notável de potência ativa. Na presença de harmônicas de corrente (supondo ausência total de harmônicas de tensão) [25] o fator de potência fica definido por:

$$\boxed{FP = \frac{FD}{\sqrt{(1 + TDH^2)}}} \quad (1.1)$$

Onde:

$$\boxed{FD = \cos(\phi)} \quad (1.2)$$

$$\boxed{\text{TDH} = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2}} \quad (1.3)$$

FP – Fator de potência

FD – Fator de deslocamento

ϕ – Defasagem angular entre a fundamental da corrente e a fundamental da tensão

TDH – Taxa de distorção harmônica

I_n – Harmônica de corrente de ordem “ n “ ($n \times 60$ Hz)

I_1 – Componente fundamental da corrente (60 Hz)

Em sistemas onde não há presença de componentes harmônicas (TDH = 0) o fator de potência é igual ao o fator de deslocamento.

Com o aumento da amplitude das harmônicas de corrente haverá um acréscimo na TDH do sistema, levando a uma redução do fator de potência da instalação.

No Brasil ainda não existe uma norma com caráter de lei, que exija dos consumidores a manutenção da forma de onda da tensão e da corrente no ponto de entrega de energia, ou que limite o conteúdo harmônico injetado no sistema elétrico. Atualmente uma norma está sendo desenvolvida pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, para tentar sanar esta necessidade. A norma mais utilizada nos diversos países é a norma IEEE 519, de 1992 [23]. Esta norma estabelece a máxima distorção harmônica de tensão e corrente que uma instalação pode apresentar em seu ponto de recebimento de energia, seja total ou seja por frequência múltipla da fundamental. A tabela abaixo ilustra a distorção máxima de corrente em percentagem da fundamental permitida pela IEEE 519.

Tabela 1.1 – Amplitude máxima de harmônicas segundo a norma IEEE 519.

I_{sc}/I_L	< 11	11 < H < 17	17 < H < 23	23 < H < 35	35 < H	THD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < I_{sc}/I_L < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < I_{sc}/I_L < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < I_{sc}/I_L < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
1000 < I_{sc}/I_L	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Algumas observações devem ser feitas sobre esta norma:

- As harmônicas pares são limitadas à 25% do limite da harmônica ímpar imediatamente superior.
- Não é permitida componente contínua
- O fator I_{SC}/I_L é determinado pela relação entre a corrente de curto-circuito e a corrente máxima do sistema (plena carga - corrente fundamental).

Abaixo ilustra-se as normas para distorção harmônica da tensão para sistemas alimentados com tensões até 480V.

Tabela 1.2 – Profundidade máxima dos “dentes”, TDH e área dos dentes permitida na norma IEEE 519.

	APLICAÇÕES ESPECIAIS	SISTEMAS COMUNS	SISTEMAS DEDICADOS
Profundidade dos "Dentes" (Notches)	10%	20%	50%
THD	3%	5%	10%
Na: Área dos Dentes	16400	22800	36500

O valor de Na deve ser multiplicado pela relação $\frac{V_{sist}}{480}$ caso a tensão não seja 480V, sendo o valor da área dado em V.μs.

Usualmente utiliza-se esta norma como referência para projetos de análise da qualidade de energia em instalações elétricas. A norma também foi utilizada como referência para os projetos realizados neste trabalho, buscando uma uniformidade geral com demais estudos realizados na mesma área por diversos pesquisadores brasileiros e estrangeiros.

As cargas não-lineares comumente encontradas em instalações elétricas que provocam a inserção de harmônicas na rede elétrica são:

- ◆ Retificador monofásico com filtro capacitivo
- ◆ Gradadores para controle de velocidade
- ◆ Controladores de temperatura para chuveiros elétricos
- ◆ Retificador trifásico de 6 pulsos
- ◆ Retificador trifásico de 12 pulsos
- ◆ Controladores de luminosidade (dimmer)

Pode-se observar que as cargas geradoras de harmônicas podem aparecer tanto em instalações residenciais, como industriais ou comerciais. Portanto, o problema de perda de qualidade na energia não é preocupação exclusiva de instalações industriais, mas sim uma preocupação para todos os segmentos de consumidores.

Devido a todos os problemas já citados, tratou-se de procurar maneiras de filtrar as correntes harmônicas inseridas na rede elétrica. Duas técnicas foram desenvolvidas para tentar sanar estes problemas:

- ⇒ **Filtragem passiva de harmônicos:** Caracteriza-se pelo uso de elementos passivos, indutores e capacitores, para filtrar correntes harmônicas que estejam sendo inseridas na rede de energia elétrica por um equipamento ou por vários equipamentos de uma instalação.
- ⇒ **Filtragem ativa de harmônicos:** Utiliza semicondutores, para, através de técnicas de controle e de comando dos mesmos, gerar correntes que anulem a presença das harmônicas na rede de energia elétrica.

Como pode-se observar há grande diferença no princípio de funcionamento entre os dois métodos citados. Cada um destes apresenta vantagens e desvantagens, das quais pode-se destacar:

➤ **Vantagens da técnica passiva:**

- Boa confiabilidade
- Baixo custo de implementação
- Baixo custo de manutenção
- Reduzidas perdas

➤ **Desvantagens da Técnica Passiva:**

- Grande volume e peso dos indutores
- Grande variação dos valores práticos dos capacitores
- Possibilidade de perda de sintonia
- Possibilidade de ressonâncias

Idealmente o modelo do filtro shunt sintonizado deveria apresentar resistência equivalente nula ($R_{SH} = 0$), para que o filtro fosse visto pela componente harmônica tal como um curto-circuito. Na prática sabe-se que este fato é impossível e que, por melhor que seja o componente, sempre haverá uma resistência incluída em sua configuração elétrica. Devido à presença da resistência equivalente e da variação de parâmetros encontrada na confecção dos indutores e capacitores, a filtragem passiva com o uso exclusivo de filtros shunt sintonizados não possibilita a capacidade de filtrar todo e qualquer conteúdo harmônico presente na rede elétrica. Com isto, sempre há a possibilidade de mesmo com filtros sintonizados haver conteúdo harmônico na rede, o qual não conseguiu ser plenamente filtrado. Além deste fato, cabe destacar que há a possibilidade de haver ressonância entre filtros sintonizados de diferentes frequências, ou entre os filtros e bancos de capacitores, os quais são alocados para a correção do fator de deslocamento. Todos estes pontos citados mostram que o projeto de filtros sintonizados não apresenta-se como uma tarefa fácil e de grande entendimento por parte da maioria dos engenheiros que trabalham nesta área.

Outra técnica de filtragem passiva que pode ser utilizada é a de bloqueio de harmônicas. Este método pode apresentar a configuração LC paralelo ou LC série. Por pleno desconhecimento ou por falta de um completo entendimento de seu funcionamento, esta estrutura é raramente citada ou utilizada em projetos de filtragem passiva. A filtragem de bloqueio pode apresentar quatro variações diferentes utilizáveis: bloqueio paralelo de fase, bloqueio paralelo de neutro, bloqueio série de fase e bloqueio série de neutro.

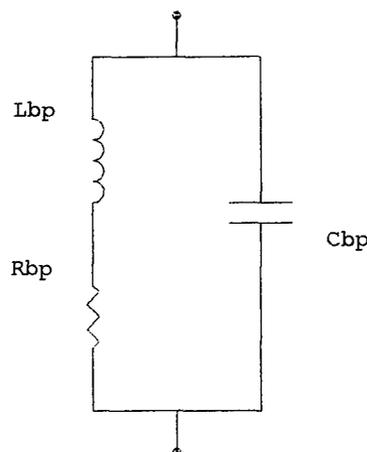


Figura 1.2 – Filtro de bloqueio LC paralelo.

Há também a possibilidade de utilização de técnicas passivas de filtragem shunt e de bloqueio conjuntamente, porém não encontradas facilmente na literatura técnica.

Diante de todos os pontos relatados, os objetivos do trabalho apresentado são:

- (a) Desenvolver a análise sobre filtros shunt sintonizados, caracterizando seu modelo, sua resposta em frequência, os métodos clássicos de projeto, o desenvolvimento de novos métodos de projeto, técnicas de implementação de componentes do filtro e técnicas para melhoria do desempenho da filtragem.
- (b) Apresentar vários tipos de filtros de bloqueio, com suas características e peculiaridades. Desenvolvendo metodologias de projeto e de implementação prática.
- (c) Apresentar as vantagens de estruturas híbridas, ou seja, estruturas que utilizam filtros shunt e de bloqueio para a filtragem de harmônicas, caracterizando os passos de implementação e análise destas estruturas.
- (d) Gerar modelos de simulação para caracterização de vários tipos de instalações elétricas, especialmente para instalações comerciais.
- (e) Implementar parte das técnicas apresentadas e validar os resultados teóricos encontrados.

Com estes objetivos procura-se apresentar novas técnicas de filtragem passiva de harmônicas que possam resultar em melhorias significativas em todos os tipos de instalações elétricas.

Capítulo 2 – O Filtro Shunt Sintonizado

2.1 – Introdução

Este capítulo procura apresentar vários aspectos de funcionamento e projeto da unidade básica na área de filtragem de correntes harmônicas em instalações de baixa tensão, o filtro shunt sintonizado. Será apresentada a estrutura ideal e real do filtro, seus parâmetros, suas características de filtragem, seu comportamento diante de eventuais variações de parâmetros, o comportamento quando da associação de vários filtros de diferentes frequências em paralelo e as metodologias clássicas e propostas na área de projeto, execução e implementação destes filtros.

O projeto de filtros shunt sintonizados pode ser considerado por todos os projetistas e engenheiros como o conhecimento básico e extremamente necessário para o completo entendimento das técnicas e dos problemas enfrentados na área de filtragem passiva de harmônicas.

2.2 - Características Gerais do Filtro Shunt Sintonizado

A estrutura classicamente projetada e utilizada na filtragem passiva de correntes harmônicas em instalações elétricas de baixa tensão é o filtro shunt sintonizado. Sua estrutura básica pode ser vista na figura 2.1.

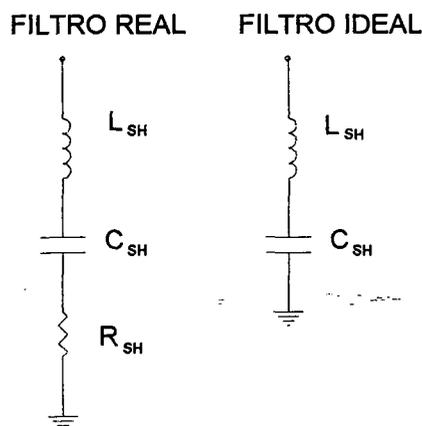


Figura 2.1 – Estrutura do filtro shunt sintonizado real e ideal

Este filtro caracteriza-se pela associação série de um indutor e um capacitor, sendo este arranjo colocado entre cada uma das fases e o neutro da instalação elétrica. Com esta configuração procura-se projetar os valores do indutor e do capacitor de tal forma que, na frequência de ressonância (f_0) do circuito, a impedância do mesmo seja nula. Este efeito pode ser analisado através do equacionamento considerando o modelo de filtro ideal.

A impedância do circuito pode ser determinada pela equação:

$$Z_F(\omega) = i \cdot \omega \cdot L_{SH} + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{SH}} \quad (2.1)$$

Onde:

L_{SH} – Valor da indutância do filtro [H]

C_{SH} – Valor da capacitância do filtro [F]

i – Valor imaginário ($\sqrt{-1}$)

ω – Frequência [rad/s]

f – Frequência [Hz]

Sendo:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.2)$$

O módulo da impedância do filtro fica determinada pela equação:

$$|Z_F(\omega)| = \left(\omega \cdot L_{SH} - \frac{1}{\omega \cdot C_{SH}} \right) \quad (2.3)$$

Quando o valor do módulo da reatância indutiva for igual ao valor do módulo da reatância capacitiva determina-se a frequência de ressonância do filtro.

$$Z_F(\omega_0) = 0 \quad (2.4)$$

Nesta condição tem-se:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{SH} \cdot C_{SH}}} \quad (2.5)$$

$$f_o = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_{SH} \cdot C_{SH})}} \quad (2.6)$$

O valor do módulo da impedância do filtro em função da frequência é apresentado na figura 2.2, tendo como exemplo valores de indutância $L_{SH} = 500\mu\text{H}$ e de capacitância $C_{SH} = 562,90\mu\text{F}$, os quais levarão a uma frequência de ressonância $f_o = 300 \text{ Hz}$.

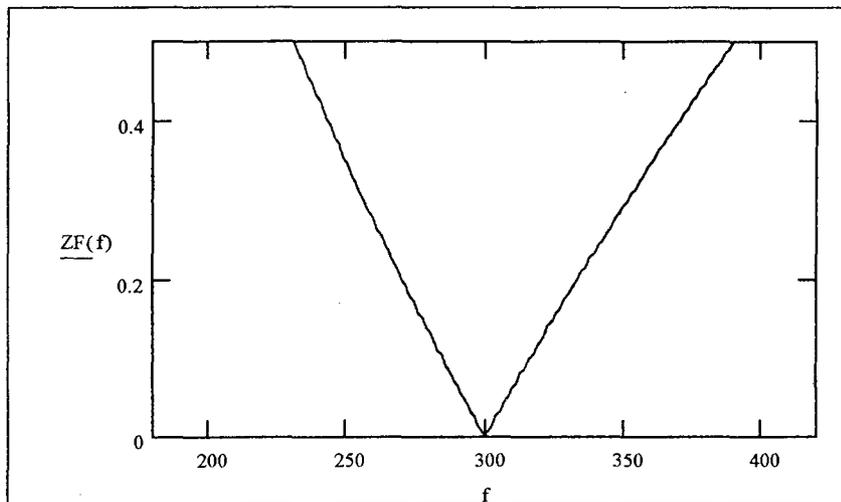


Figura 2.2 – Exemplo da resposta em frequência de um filtro shunt sintonizado ideal.

Na prática, os capacitores e indutores não apresentam comportamento ideal, existindo sempre uma pequena resistência associada a cada elemento. Como a configuração do circuito apresenta uma associação em série dos elementos, a resistência equivalente do mesmo circuito também apresentará a associação em série das resistências dos dois componentes, indutor e capacitor. Portanto o equacionamento do circuito considerando a presença da resistência equivalente, fica assim definida:

Impedância do Filtro:

$$Z_F(\omega) = R_{SH} + i \cdot \omega \cdot L_{SH} + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{SH}} \quad (2.7)$$

Módulo da Impedância do Filtro:

$$|Z_F(\omega)| = \sqrt{R_{SH}^2 + \left(\omega \cdot L_{SH} - \frac{1}{\omega \cdot C_{SH}} \right)^2} \quad (2.8)$$

Substituindo a equação (2.4) na equação (2.8) obtém-se:

$$|Z_F(\omega_o)| = R_{SH} \quad (2.9)$$

No caso em que considera-se a resistência série do circuito, a frequência de ressonância passa a ser caracterizada genericamente como a frequência na qual há o cancelamento total do efeito indutivo e capacitivo, restando somente a presença do elemento resistivo do circuito.

Adotando os mesmos parâmetros utilizados para o exemplo ideal, sendo considerada apenas a inserção de uma resistência equivalente $R_{SH} = 100 \text{ m}\Omega$, a resposta em frequência do módulo da impedância do filtro shunt pode ser então visualizada na figura 2.3.

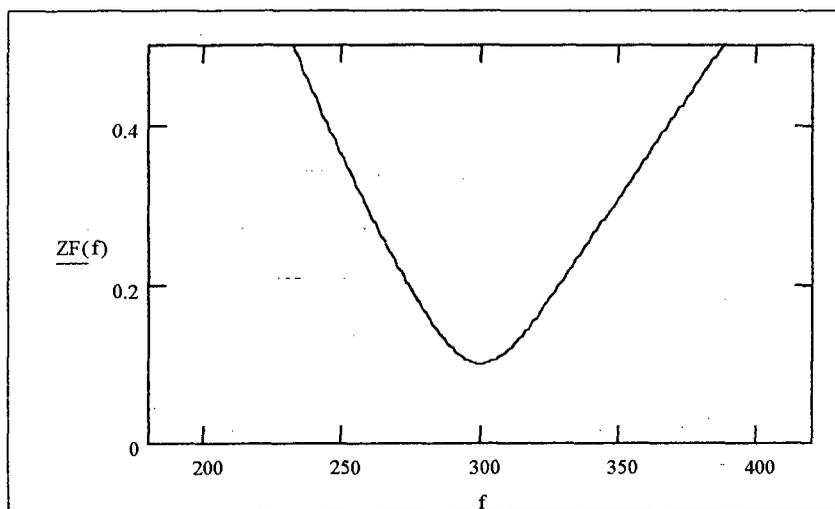


Figura 2.3 – Exemplo da resposta em frequência de um filtro shunt sintonizado real.

O valor da resistência equivalente é fundamental no processo de filtragem, pois na frequência de ressonância somente este elemento ficará “ visível ” à componente harmônica de corrente de mesma frequência do filtro. Desta breve análise pode-se obter uma conclusão fundamental no entendimento do funcionamento do filtro shunt:

“ Quanto menor for a resistência equivalente obtida na configuração dos elementos do filtro shunt sintonizado, melhor será sua qualidade de resposta em termos de filtragem da corrente harmônica de mesma frequência. ”

Este é um aspecto muito importante na análise deste trabalho pois levará a novos princípios de avaliação de parâmetros, os quais serão posteriormente apresentados.

2.3 - Variação de Parâmetros e sua Influência na Resposta de um Filtro Shunt Sintonizado

2.3.1 - Variação de L_{sh} e C_{sh} de um Filtro Shunt Sintonizado

A indutância e a capacitância utilizadas no projeto de um filtro shunt sintonizado podem apresentar infinitos valores para uma mesma frequência de ressonância, desde que a equação (2.8) seja sempre satisfeita. Um dos principais questionamentos em termos do projeto de filtros shunt sintonizados é: *qual a melhor composição de valores que podem ser utilizados para projeto e qual a sua influência na resposta do filtro*. Esta resposta exige um pleno conhecimento da característica do filtro e de sua resposta em frequência para uma alteração de parâmetros do mesmo.

Inicia-se considerando um filtro hipotético, com frequência de ressonância fixada em 300 Hz. A resistência equivalente do filtro é estabelecida como sendo um valor constante ($R_{SH} = 50m\Omega$). Variar-se-ão os valores do indutor e do capacitor do filtro de tal forma que a equação (2.6) continue sendo atendida. O parâmetro base de variação será o indutor, com conseqüente variação do valor do capacitor. Pode-se observar a variação estabelecida dos parâmetros, bem como a variação da impedância do filtro em função da frequência, para todos os valores combinados.

Tabela 2.1 – Valores de indutância e capacitância utilizados.

f_s (Hz)	Valor do Indutor (μH)	Valor do Capacitor (μF)
300	100,00	2814,48
300	200,00	1407,24
300	300,00	938,16
300	400,00	703,62
300	500,00	562,90
300	600,00	469,08
300	700,00	402,07
300	800,00	351,81
300	900,00	312,72
300	1000,00	281,45

Considerando L_{SH} variável obtém-se:

$$L_{SH} = \frac{1}{\omega_o^2 \cdot C_{SH}} \tag{2.10}$$

Utilizando a equação (2.8) para cada par de valores (L_{SH} , C_{SH}) calculados, define-se várias funções $Z(f, L_{SH})$, sendo suas respostas de impedância em função da frequência apresentadas na figura 2.4 e na tabela 2.2.

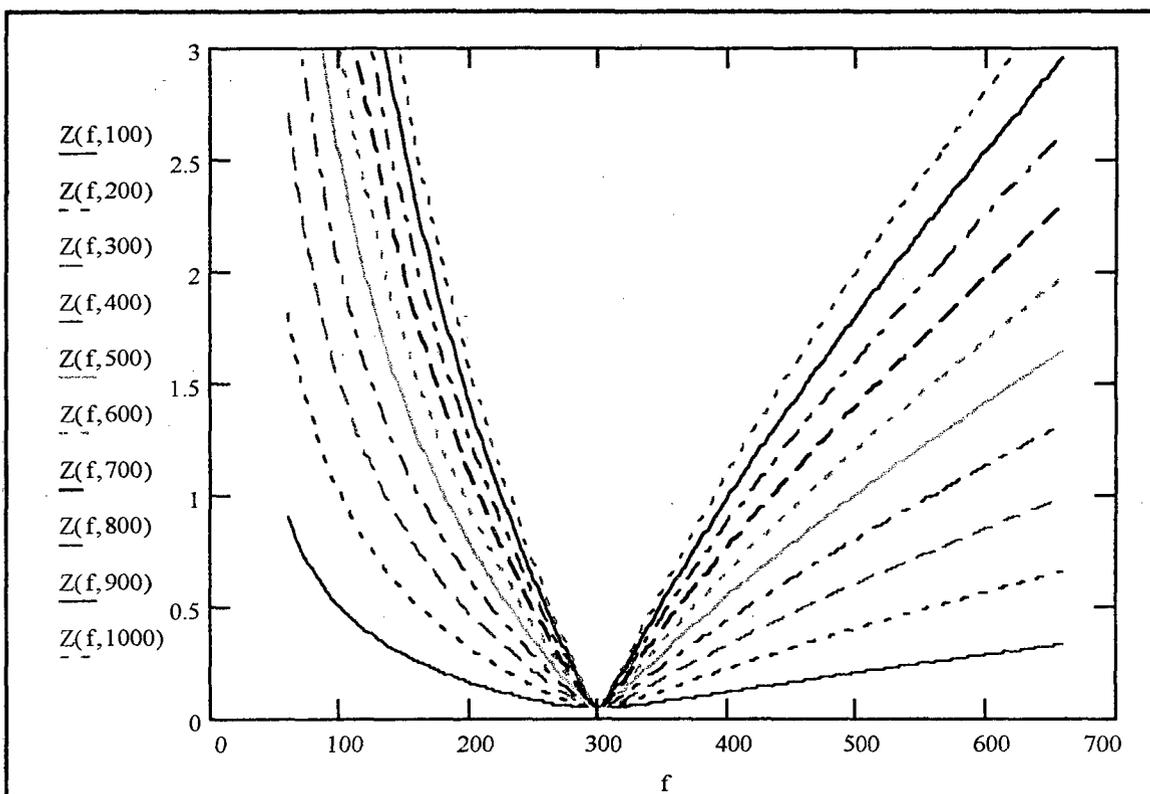


Figura 2.4 – Resposta em frequência da impedância do filtro para variações de L_{shunt} e C_{shunt} .

Tabela 2.2 – Valores de impedância obtidos para diferentes frequências e valores de L_{shunt} e C_{shunt} .

VALOR DO INDUTOR (μH)	VALOR DO CAPACITOR (μF)	$Z(f = 60)$	$Z(f = 180)$	$Z(f = 300)$	$Z(f = 420)$	$Z(f = 660)$	$Z(f = 780)$
100,00	2814,48	0,91 Ω	0,21 Ω	0,05 Ω	0,14 Ω	0,33 Ω	0,42 Ω
200,00	1407,24	1,81 Ω	0,41 Ω	0,05 Ω	0,26 Ω	0,66 Ω	0,84 Ω
300,00	938,16	2,71 Ω	0,61 Ω	0,05 Ω	0,39 Ω	0,99 Ω	1,25 Ω
400,00	703,62	3,62 Ω	0,81 Ω	0,05 Ω	0,52 Ω	1,32 Ω	1,67 Ω
500,00	562,90	4,52 Ω	1,01 Ω	0,05 Ω	0,65 Ω	1,65 Ω	2,09 Ω
600,00	469,08	5,43 Ω	1,21 Ω	0,05 Ω	0,78 Ω	1,97 Ω	2,51 Ω
700,00	402,07	6,33 Ω	1,41 Ω	0,05 Ω	0,91 Ω	2,30 Ω	2,92 Ω
800,00	351,81	7,24 Ω	1,61 Ω	0,05 Ω	1,04 Ω	2,63 Ω	3,34 Ω
900,00	312,72	8,14 Ω	1,81 Ω	0,05 Ω	1,16 Ω	2,96 Ω	3,76 Ω
1000,00	281,45	9,05 Ω	2,01 Ω	0,05 Ω	1,29 Ω	3,29 Ω	4,18 Ω

Pode-se destacar alguns pontos sobre os dados apresentados:

1. Quanto maior for o valor da indutância, e portanto menor o valor da capacitância, mais “fechado” torna-se o filtro, ou seja, menor a faixa de frequência em que sua impedância apresentará baixos valores. Por consequência, quanto menor for o valor da indutância, mais “aberto” torna-se o filtro, ou seja, maior será a faixa de frequência em que sua impedância apresentará baixos valores.
2. Quanto mais “aberta” apresentar-se a resposta em frequência da impedância do filtro, maior será também seu carregamento em termos da componente fundamental, devido a baixa impedância apresentada em baixas frequências. Isto acarreta que a característica capacitiva do filtro será muito mais preponderante em baixas frequências, implicando em um aumento da corrente fundamental reativa capacitiva, que atuará diretamente no fator de deslocamento do sistema.

Percebe-se inicialmente que quanto menor for a indutância do filtro, melhor será sua característica de filtragem. Mesmo que ocorra a perda parcial de sua sintonia, em termos de um baixo deslocamento da frequência de ressonância, a impedância do filtro continuará apresentando baixo valor na frequência da harmônica a ser filtrada. Por este motivo *deve-se sempre procurar projetar filtros com baixos valores de indutância.*

Em instalações de elevada potência e baixo fator de deslocamento e em instalações de média potência e de baixo fator de deslocamento, nas quais as componentes de corrente reativa indutiva apresentam elevado valor, consegue-se adotar baixos valores de indutância para projetos de filtros sintonizados. Isto ocorre devido a possibilidade e necessidade de utilização de elevados valores de capacitância para a correção do fator de deslocamento.

Em instalações de baixa potência e de baixo fator de deslocamento, os valores de indutância a serem utilizados no projeto de filtros sintonizados apresentarão elevados valores. Para estes casos a análise e projeto de filtros shunt sintonizados deve ser extremamente bem avaliada, pois muitas peculiaridades de projeto e execução são necessárias para uma boa performance em termos de filtragem harmônica.

2.3.2 - Variação de R_{sh} de um Filtro Shunt Sintonizado

Com o entendimento claro da influência da variação dos parâmetros L_{SH} e C_{SH} na resposta do filtro shunt sintonizado, cabe então apresentar a influência da resistência equivalente do circuito (R_{SH}) na resposta em frequência de sua impedância. Mantém-se os valores do indutor e do capacitor constantes, definidos como $L_{SH} = 500\mu H$ e de $C_{SH} = 562,90\mu F$, de forma que a frequência de ressonância seja $f_0 = 300Hz$, e varia-se o valor da resistência R_{SH} de 20 a 200m Ω , em passos de 20m Ω . Utilizando a equação (2.8) obtém-se diferentes respostas de impedância do filtro em função da frequência, como pode ser visualizado na figura 2.5.

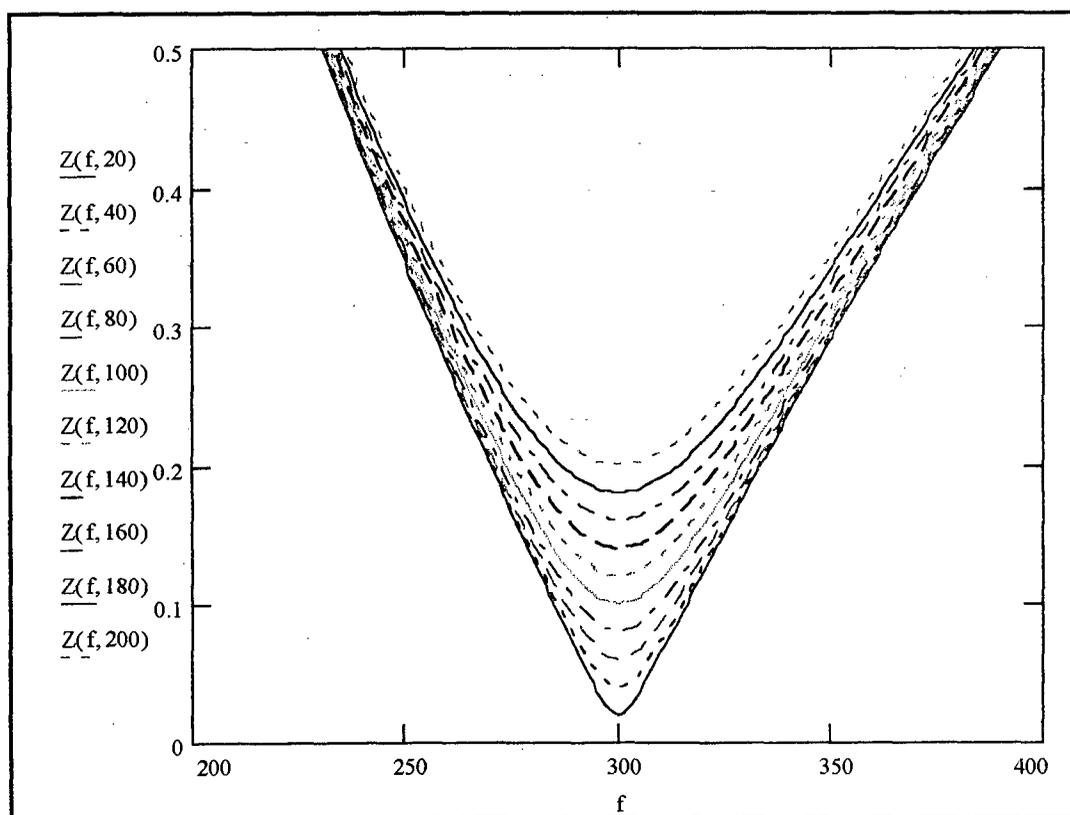


Figura 2.5 – Resposta em frequência da impedância do filtro com variação de R_{shunt} .

Observa-se que a forma da resposta em frequência da impedância do filtro não varia significativamente em termos da função da variação do valor da resistência (R_{SH}). Este fato leva a conclusão que o valor da resistência a ser utilizada em qualquer projeto de filtros

shunt sintonizados não influenciará significativamente na forma de sua impedância em função da frequência, *apenas elevando o valor da impedância em torno da frequência de ressonância*. Diante deste fato pode-se afirmar que a conclusão apresentada no item (2.2) possui validade comprovada, ou seja, a melhoria na filtragem será maior na medida que, na frequência de ressonância, haja o menor valor de impedância possível, neste caso o valor da resistência (R_{SH}). *Conclui-se que a variação de R_{SH} não apresenta influência na sintonia do filtro e não afeta significativamente a forma da resposta em frequência de sua impedância*.

2.4 - Associação em Paralelo de Filtros Shunt Sintonizados em Diferentes Frequências

Como cada filtro shunt possui sua frequência de ressonância, na presença de um conteúdo harmônico distribuído em várias frequências múltiplas da fundamental é necessário o uso de um filtro sintonizado para cada frequência que deseja-se filtrar. Este procedimento fica claro devido a própria resposta em frequência do filtro shunt sintonizado, anteriormente apresentada.

A colocação em paralelo de vários filtros sintonizados pode ocasionar a modificação da resposta em frequência da impedância de cada um destes filtros obtida isoladamente. Este fato é claramente observado, pois como a estrutura do filtro não pode ser eletricamente desacoplada de um outro filtro alocado na mesma fase, sempre haverá a interação entre elementos, causando modificação em sua resposta. A principal preocupação deve ser a noção de *quanto a colocação de filtros em paralelo interfere na sintonia e na resposta em frequência de cada um destes filtros se analisados separadamente*.

Para realizar este estudo inicia-se fixando valores para dois filtros shunt sintonizados, cujos dados estão abaixo descritos.

$$L_{SH1} = 100\mu\text{H} / 200\mu\text{H} / 300\mu\text{H} / 400\mu\text{H} / 500 \mu\text{H}$$

$$C_{SH1} = 2,81\text{mF} / 1,407\text{mF} / 938\mu\text{F} / 704\mu\text{F} / 526,90 \mu\text{F}$$

$$R_{SH1} = 50\text{m}\Omega$$

$$f_{o1} = 300 \text{ Hz}$$

$$L_{SH2} = 100\mu\text{H} / 200\mu\text{H} / 300\mu\text{H} / 400\mu\text{H} / 500 \mu\text{H}$$

$$C_{SH2} = 1,436\mu\text{F} / 718\mu\text{F} / 478\mu\text{F} / 359\mu\text{F} / 287,20 \mu\text{F}$$

$$R_{SH2} = 80\text{m}\Omega$$

$$f_{o2} = 420 \text{ Hz}$$

Define-se a equação de cada um dos filtros isoladamente e de ambos os filtros combinados.

Considerando

$$s = i \cdot \omega \quad (2.12)$$

Equações dos Filtros:

$$Z_{SH1}(s) = R_{SH1} + s \cdot L_{SH1} + \frac{1}{s \cdot C_{SH1}} \quad (2.13)$$

$$Z_{SH2}(s) = R_{SH2} + s \cdot L_{SH2} + \frac{1}{s \cdot C_{SH2}} \quad (2.14)$$

$$Z_{SH12}(s) = \frac{\left(R_{SH1} + s \cdot L_{SH1} + \frac{1}{s \cdot C_{SH1}} \right) \cdot \left(R_{SH2} + s \cdot L_{SH2} + \frac{1}{s \cdot C_{SH2}} \right)}{(R_{SH1} + R_{SH2}) + s \cdot (L_{SH1} + L_{SH2}) + \frac{(C_{SH1} + C_{SH2})}{s \cdot C_{SH1} \cdot C_{SH2}}} \quad (2.15)$$

Módulo da Impedância do Filtros:

$$|Z_{SH1}(s)| = \sqrt{\left(R_{SH1}^2 + \left(\omega \cdot L_{SH1} - \frac{1}{\omega \cdot C_{SH1}} \right)^2 \right)} \quad (2.16)$$

$$|Z_{SH2}(s)| = \sqrt{\left(R_{SH2}^2 + \left(\omega \cdot L_{SH2} - \frac{1}{\omega \cdot C_{SH2}} \right)^2 \right)} \quad (2.17)$$

$$|Z_{SH12}(s)| = \frac{|Z_{SH1}(s)| \cdot |Z_{SH2}(s)|}{\sqrt{\left((R_{SH1} + R_{SH2}) + \left[\omega \cdot (L_{SH1} + L_{SH2}) - \frac{1}{\frac{C_{SH1} \cdot C_{SH2}}{C_{SH1} + C_{SH2}} \cdot \omega} \right]^2 \right)}} \quad (2.18)$$

Obtém-se então as respostas em função da frequência para a impedância total $Z_{SH12}(s)$.

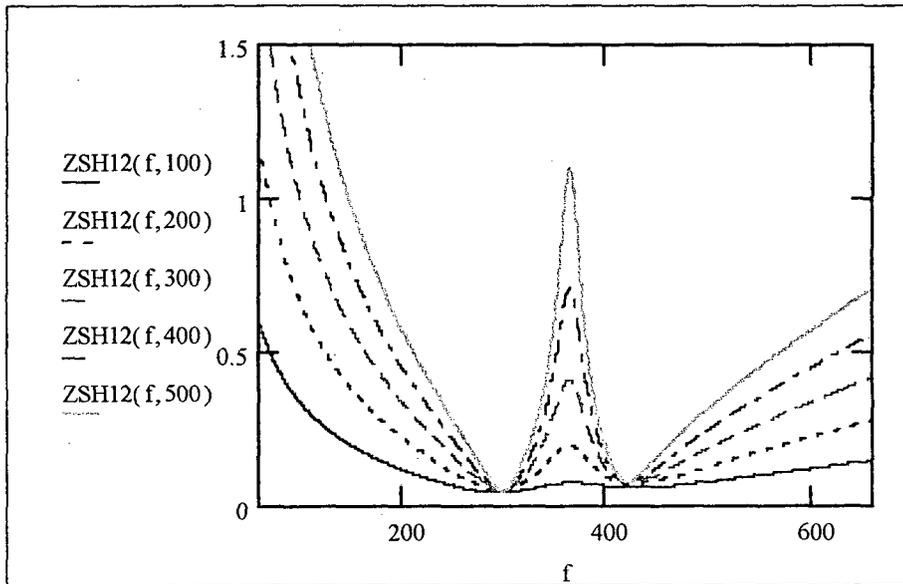


Figura 2.6 – Resposta em frequência dos filtros shunt combinados.

Na figura 2.6 $Z_{SH12}(f,k)$ indica o módulo da impedância total em função da frequência, para diferentes projetos de filtros, onde k indica o valor (em μH) das indutâncias L_{SH1} e L_{SH2} .

Pode-se observar que o comportamento individual de ambos os filtros sofre modificações em relação ao comportamento da composição entre ambos. Próximo das frequências de ressonância de cada filtro praticamente não há variação do comportamento do filtro composto em relação ao comportamento individual. A grande diferença entre as respostas obtidas está exatamente nas faixas que não compreendem as frequências de ressonância. Pode-se destacar os seguintes pontos sobre estas faixas de frequência:

- (a) A impedância do filtro composto apresentará valores reduzidos em baixas frequências, devido a associação em paralelo da característica capacitiva de

ambos os filtros, que acarretará um valor mais elevado de capacitância equivalente e por consequência, um valor mais baixo de impedância do filtro composto.

- (b) A impedância do filtro composto apresentará valores reduzidos também em elevadas frequências devido a associação em paralelo da característica indutiva de ambos os filtros, que acarretará um valor mais reduzido de indutância equivalente e por consequência, um valor mais baixo de impedância do filtro composto.
- (c) Na região localizada entre as duas frequências de ressonância existe a caracterização de uma terceira ressonância, que advém da associação em paralelo do efeito indutivo do filtro de menor frequência de ressonância com o efeito capacitivo do filtro de maior frequência de ressonância. Como a característica indutiva prevalece em frequências acima da frequência de ressonância do primeiro filtro (f_{o1}) e a característica capacitiva prevalece em frequências abaixo da frequência de ressonância do segundo filtro (f_{o2}), há a formação de um circuito LC paralelo entre as duas frequências de ressonância, que também apresenta sua própria frequência de ressonância, porém com característica inversa do filtro LC série. Na nova frequência de ressonância, os valores de impedância apresentarão elevados valores.

Como o filtro LC paralelo apresenta um comportamento contrário ao do filtro LC série (filtro shunt sintonizado), ao invés das correntes harmônicas serem atenuadas, estas serão amplificadas. Este fato ocorrerá somente se houver conteúdo harmônico de mesma frequência de ressonância do filtro LC paralelo circulando na rede elétrica. Observando a característica da equação (2.18) conclui-se que a frequência de amplificação constitui-se da associação série dos dois indutores L_{SH} e da associação em paralelo das duas capacitâncias C_{SH} , formando o indutor e o capacitor equivalentes do filtro LC paralelo. A frequência de amplificação fica então determinada por:

$$L_{AMPL} = L_{SH1} + L_{SH2} \quad (2.19)$$

$$C_{\text{AMPL}} = \frac{C_{\text{SH1}} \cdot C_{\text{SH2}}}{C_{\text{SH1}} + C_{\text{SH2}}} \quad (2.20)$$

$$\omega_{\text{AMPL}} = \frac{1}{\sqrt{L_{\text{AMPL}} \cdot C_{\text{AMPL}}}} \quad (2.21)$$

$$f_{\text{AMPL}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\text{AMPL}} \cdot C_{\text{AMPL}}}} \quad (2.22)$$

Utilizando os valores dos filtros shunt sintonizados calcula-se a frequência de amplificação.

$$L_{\text{AMPL}} = 500\mu\text{H} + 500\mu\text{H} = 1\text{mH}$$

$$C_{\text{AMPL}} = \frac{526,9\mu\text{F} \cdot 287,2\mu\text{F}}{526,9\mu\text{F} + 287,2\mu\text{F}} = 186\mu\text{F}$$

$$\omega_{\text{AMPL}} = \frac{1}{\sqrt{1\text{mH} \cdot 186\mu\text{F}}} = 2318\text{rad/s}$$

$$f_{\text{AMPL}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{1\text{mH} \cdot 186\mu\text{F}}} = 369\text{Hz}$$

Percebe-se que a frequência de amplificação encontra-se aproximadamente centrada entre as duas frequências de ressonância e sofrerá deslocamento caso haja um deslocamento de qualquer uma das frequências de ressonância dos filtros shunt sintonizados. Este é um dos maiores problemas apresentados por esta estrutura de filtragem. Caso haja a perda de sintonia, corre-se o risco de que a frequência de amplificação do filtro composto coincida com uma das componentes harmônicas do sistema, amplificando-a e degradando a forma de onda da corrente, aumentando assim a distorção harmônica, ou ainda amplificando de tal maneira a componente harmônica, que possa haver atuação indevida da proteção ou sobrecarga no alimentador (transformador). Este problema pode ocorrer devido a perda de capacitores que compõe o(s) filtro(s) ou pela variação dos valores de L_{SH} e C_{SH} em sua fase de construção.

Para cada associação em paralelo de dois filtros shunt sintonizados, ocorrerá a presença de uma frequência de amplificação de harmônica. Esta frequência sempre estará situada entre as duas frequências de ressonância dos filtros shunt projetados. O efeito da ressonância do filtro LC paralelo é uma das piores consequências passíveis de ocorrência no uso de filtros shunt sintonizados.

2.5 - Variação de L_{sh} e C_{sh} de Filtros Shunt Sintonizados em Paralelo

Ao associar-se filtros shunt sintonizados de diferentes frequências em paralelo, é necessário observar a influência de possíveis variações de parâmetros que possam ocorrer em cada filtro. Com base no que foi apresentado no item (2.3.1) variar-se-ão os valores de indutância e de capacitância de cada filtro de tal forma que a frequência de ressonância de cada um destes permaneça constante, conforme a equação (2.6). Os valores de resistência dos filtros serão mantidos constantes. Nas tabelas 2.3 e 2.4 ilustra-se a relação de valores a serem utilizados para análise, considerando a presença de dois filtros shunt, sintonizados em 300 e 420 Hz.

Primeiro Filtro: ($f_0 = 300$ Hz)

Tabela 2.3 – Dados do primeiro filtro shunt ($f_0 = 300$ Hz).

FREQUÊNCIA (HZ)	INDUTÂNCIA (μ H)	CAPACITÂNCIA (μ F)
300	100	2814,46
300	200	1407,23
300	300	938,15
300	400	703,62
300	500	562,89
300	600	469,08
300	700	402,07
300	800	351,81
300	900	312,72
300	1000	281,45

Segundo Filtro: ($f_0 = 420$ Hz)

Tabela 2.4 – Dados do segundo filtro shunt ($f_0 = 420$ Hz).

FREQUÊNCIA (HZ)	INDUTÂNCIA (μ H)	CAPACITÂNCIA (μ F)
420	100	1435,95
420	200	717,98
420	300	478,65
420	400	358,99

FREQUÊNCIA (HZ)	INDUTÂNCIA (μ H)	CAPACITÂNCIA (μ F)
420	500	287,19
420	600	239,33
420	700	205,14
420	800	179,49
420	900	159,55
420	1000	143,60

Utilizando a equação 2.18 pode-se determinar a resposta em frequência da impedância dos filtros shunt sintonizados em paralelo para alguns dos valores apresentados.

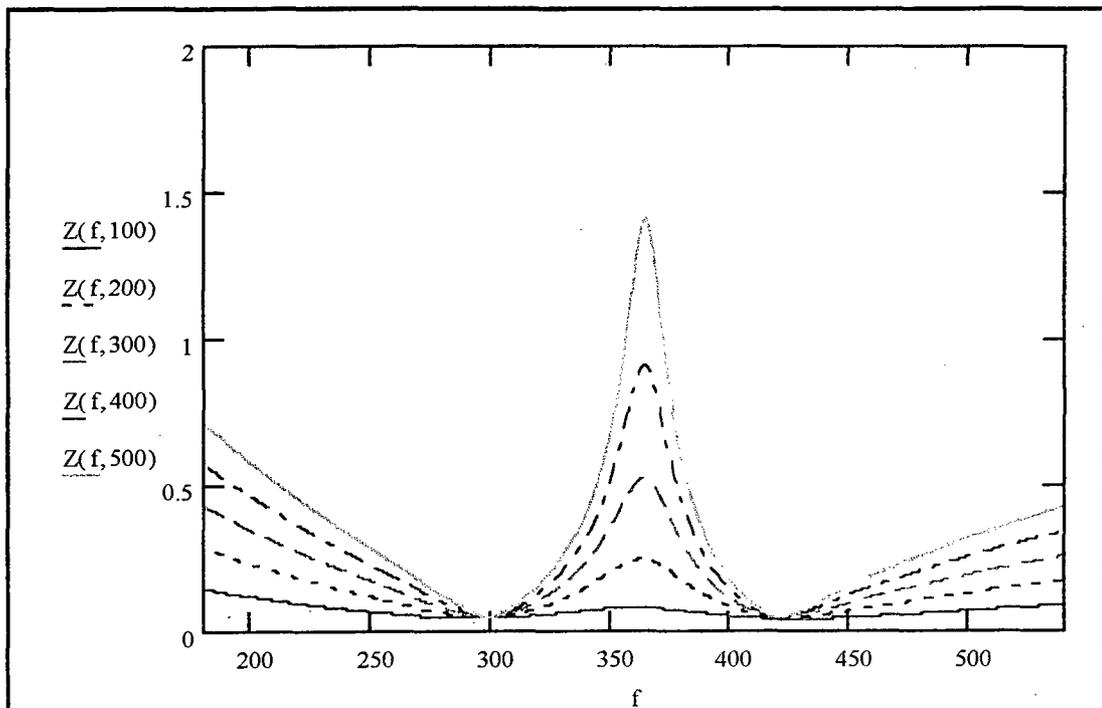


Figura 2.7 – Resposta em frequência da impedância de filtros paralelos com variação de L_{shunt} de 100 a 500 μ H.

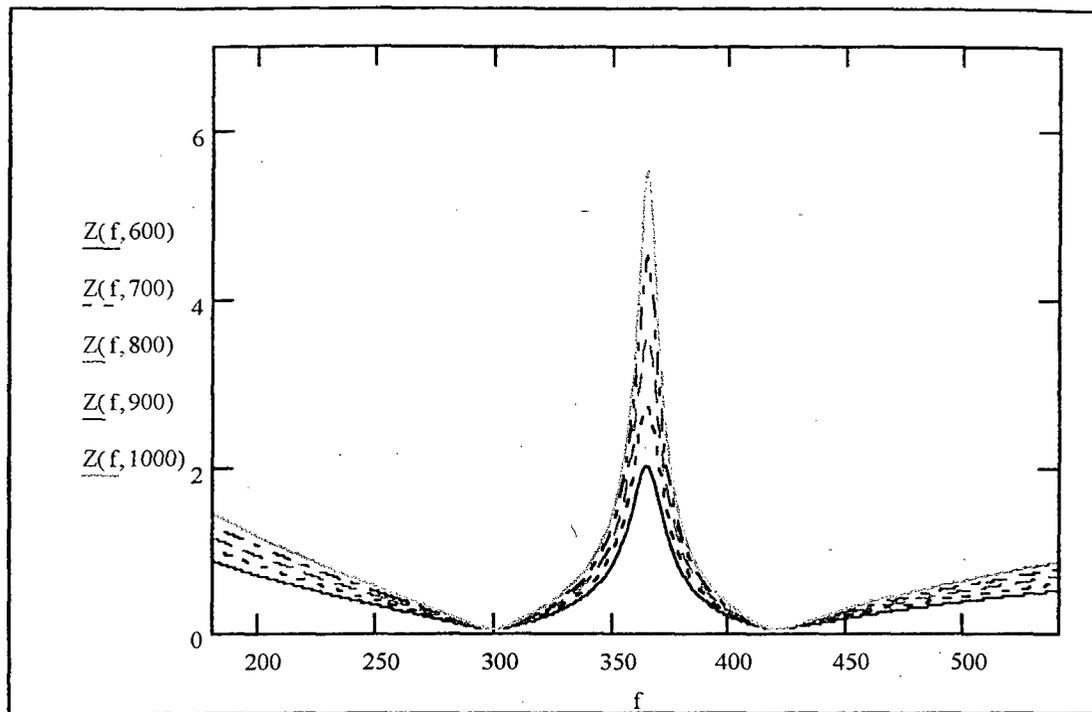


Figura 2.8 – Resposta em frequência da impedância de filtros paralelos com variação de L_{shunt} de 500 a 1000 μH .

Pode-se observar que próximo das frequências de ressonância não há variação da resposta do filtro em função da variação de parâmetros. As colocações apresentadas para o comportamento individual do filtro sintonizado continuam a prevalecer na condição em que há a colocação de filtros de diferentes frequências em paralelo. O único aspecto diferenciado que mostra-se presente nesta análise é o fato de que, com o aumento do valor da indutância, há o aumento da impedância do filtro composto na frequência de ressonância paralela LC, sendo que este efeito traduz-se em uma maior amplificação nesta frequência. Este aspecto não causará problema alguma na filtragem dos harmônicos caso a sintonia de ambos os filtros esteja de acordo com o valor projetado. Caso haja a perda de sintonia de qualquer um dos filtros pode ocorrer que a frequência de ressonância do filtro LC paralelo acabe por aproximar-se de alguma harmônica significativa do sistema, ocorrendo a amplificação da mesma e a degradação da forma de onda e da taxa de distorção harmônica.

2.6 - Projeto Clássico de Filtros Shunt Sintonizados

Como a concepção do uso do filtro LC shunt para a filtragem de harmônicos advém da análise de circuitos elétricos, seu uso e conhecimento foram há tempos largamente difundidos. Mesmo com sua estrutura simples, poucos foram os projetistas e engenheiros que buscaram apresentar métodos de análise e projeto que contemplassem um conjunto de equações definindo os parâmetros do filtro de acordo com o conteúdo harmônico existente e com as características reais de seus elementos constituintes (indutores e capacitores). Métodos utilizando diagramas de bode [24], resposta em frequência [19] entre outros, foram apresentados com o intuito de consolidar uma estrutura de projeto geral, confiável e aceitável. Dentre todas as técnicas a que mais ganhou aceitação entre o ambiente prático e acadêmico foi desenvolvida utilizando-se a noção de fator de qualidade (Q), a qual foi baseada em diversos projetos desenvolvidos na área de filtros shunt sintonizados para gerar um grupo de equações que tentassem definir os parâmetros do filtro baseados em dados do sistema. Seu conjunto de equações foi amplamente difundido e serve atualmente de base para projetos de filtragem harmônica em qualquer tipo de instalação.

O equacionamento desenvolvido encontra-se abaixo descrito em detalhes, citando todos os passos de projeto a serem seguidos.

Inicia-se determinando, através de medições, todo o conteúdo harmônico de corrente da instalação. As leituras necessárias para iniciar o projeto são:

$I_1(\text{pico})$ – corrente de pico da fundamental (60 Hz)

$I_n(\text{pico})$ – corrente de pico da harmônica n (n.60 Hz)

V_{ef} – tensão eficaz do sistema

L_s – indutância de dispersão do transformador alimentador

R_s – resistência dos enrolamentos do transformador alimentador

Determinam-se os valores das correntes eficazes da fundamental e das harmônicas.

$$\boxed{I_{1_eficaz} = \frac{I_{1_pico}}{\sqrt{2}}} \quad (2.23)$$

$$I_{n_eficaz} = \frac{I_{n_pico}}{\sqrt{2}} \quad (2.24)$$

Calcula-se a capacidade de curto circuito da instalação.

$$I_{SC} = \frac{V_{ef}}{\sqrt{(R_s)^2 + (\omega \cdot L_s)^2}} \quad (2.25)$$

Relaciona-se o valor da capacidade de curto-circuito com a corrente fundamental, com o intuito de classificar a instalação de acordo com a norma IEEE 519. A partir do valor máximo admitido no alimentador para a harmônica de ordem “ n ”, estabelece-se o valor que a mesma deverá apresentar após realizada a filtragem.

$$K_n = \frac{I_{n_percentual}}{100} \quad (2.26)$$

Escolhe-se então qual deverá ser o fator de qualidade do filtro (Q), que retrata a relação entre a resistência série do circuito e o valor da indutância. Usualmente utiliza-se este valor na faixa de 20 a 50 para projetos gerais.

Com os fatores definidos utilizam-se as seguintes equações para determinar os valores dos componentes do filtro.

$$R_{SH} = \frac{K_n \cdot I_1}{(I_n^2 - K_n^2 \cdot I_1^2)} \cdot \left[R_s \cdot K_n \cdot I_1 + \sqrt{(R_s \cdot I_1)^2 + (n \cdot \omega \cdot L_s)^2 \cdot (I_n^2 - (K_n \cdot I_1)^2)} \right] \quad (2.27)$$

$$L_{SH} = \frac{R_{SH} \cdot Q}{n \cdot \omega} \quad (2.28)$$

$$C_{SH} = \frac{1}{n^2 \cdot \omega^2 \cdot L_{SH}^2} \quad (2.29)$$

Com todos os valores dos componentes do filtro determinados, pode-se partir para a confecção e montagem dos elementos do filtro.

Como exemplo, utiliza-se um caso hipotético para apresentar os passos de cálculo a serem desenvolvidos. Considera-se um sistema com as seguintes características:

$$\begin{aligned}
 I_{1_pico} &= 150A \\
 n &= 5 \\
 I_{5_pico} &= 30A \\
 I_{5\%} &= 20\% \\
 V_{ef} &= 220V \\
 Q &= 50 \\
 R_s &= 100m\Omega \\
 L_s &= 100\mu H
 \end{aligned}$$

Determinam-se os valores das correntes eficazes da fundamental e das harmônicas.

$$I_{1_eficaz} = \frac{150}{\sqrt{2}} = 106A$$

$$I_{5_eficaz} = \frac{30}{\sqrt{2}} = 21,2A$$

Calcula-se a capacidade de curto circuito da instalação.

$$I_{SC} = \frac{220}{\sqrt{\left(0,1^2 + \left(377 \cdot 100 \cdot 10^{-6}\right)^2\right)}} = 2.058A$$

Desta forma pode-se determinar a relação entre a capacidade de curto-circuito e a corrente eficaz do sistema.

$$\frac{I_{SC}}{I_1} = \frac{2.058}{106} = 19,4$$

Com este valor adotado, a máxima corrente percentual de quinta harmônica no alimentador aceitável pela norma IEEE 519 é de 7%. Considerando que a corrente harmônica deve ficar em torno de 2% após a filtragem, determina-se o valor de K_n .

$$K_n = \frac{2}{100} = 0,02$$

Com os fatores definidos utilizam-se as equações abaixo para determinar os valores dos componentes do filtro:

$$R_{SH} = \frac{0,02 \cdot 150}{(30^2 - 0,02^2 \cdot 150^2)} \left[0,01 \cdot 0,02 \cdot 150 + \sqrt{(0,01 \cdot 150)^2 + (5 \cdot 377 \cdot 100)^2} \cdot [30^2 - (0,02 \cdot 150)^2] \right]$$

$$R_{SH} = 55 \text{m}\Omega$$

$$L_{SH} = \frac{55 \text{m} \cdot 50}{5 \cdot 377} = 1,456 \text{mH}$$

$$C_{SH} = \frac{1}{5^2 \cdot 377^2 \cdot 1,456 \text{m}^2} = 193,1 \mu\text{F}$$

Como pode-se observar, esta metodologia de cálculo apresenta fácil compreensão e desenvolvimento.

As equações apresentadas foram obtidas através de inúmeros projetos e cálculos de parâmetros desenvolvidos [19]. A cada filtro projetado deve-se obter a nova configuração das correntes do sistema, utilizando-as para o projeto de um novo filtro de frequência superior.

O método tradicional apresentado foi baseado em configurações de sistemas que apresentam elevado fator de deslocamento e elevada potência instalada. Estas duas características apresentam-se como as mais vantajosas em termos de projeto de filtros shunt sintonizados pelos seguintes fatores:

- (a) Com baixo fator de deslocamento e potência instalada será necessário o uso de elevado valor de capacitância total para adequar o fator de deslocamento à norma estabelecida. Com isto, os filtros projetados apresentarão uma reposta em frequência de sua impedância muito “aberta”, caracterizando-se por uma banda de frequência em torno de f_0 em que pode ocorrer deslocamento da sintonia do filtro sem perda da qualidade de filtragem.
- (b) Com elevado valor de capacitância em todos os filtros a serem instalados, há a redução do nível de ressonância da frequência de amplificação, ou seja, caso um

dos filtros venha a perder a sintonia a ponto da frequência de amplificação aproximar-se de uma das frequências harmônicas do sistema, a amplificação da componente harmônica será reduzida.

- (c) Com elevada potência instalada as correntes harmônicas devem apresentar valores elevados, necessitando que a área do condutor utilizado na montagem do indutor seja elevada, caracterizando baixa resistência do enrolamento e do filtro. Como o valor da indutância apresenta baixo valor devido ao elevado valor de capacitância, o indutor apresentará reduzido número de espiras, fato que ajudará a reduzir ainda mais a resistência do enrolamento do indutor.
- (d) Com baixo valor de resistência obtém-se grande melhora na qualidade de filtragem.

Diante destes aspectos o método clássico apresenta boa resposta se implementado, porém o sistema deve apresentar as características de elevados fator de deslocamento e potência instalada. Caso ambas as características não sejam satisfeitas o uso da metodologia clássica pode acarretar problemas tanto na parte de projeto, como na parte de implementação dos componentes do filtro shunt sintonizado.

2.7 - Projeto de Filtros Shunt Sintonizados Utilizando Nova Uma Metodologia

Um dos grandes problemas em termos da utilização da metodologia clássica está associada ao desenvolvimento de seu equacionamento, por tratar-se de um conjunto de equações originadas a partir de dados práticos, apresentando portanto limitações quanto a sua utilização. Com o pleno conhecimento de todas as características que compõem o filtro shunt sintonizado é possível projetá-lo tanto individualmente quanto em paralelo com outros filtros de diferentes frequências de ressonância. Para o desenvolvimento de um projeto completo é necessário extremo cuidado na parte de modelagem da instalação, projeto dos parâmetros dos filtros, construção dos componentes, montagem dos componentes e verificação por simulação e ensaios de todos os valores adotados. Com um simples equacionamento, que trata de “amarrar” os parâmetros do filtro, não se consegue

flexibilidade de projeto e perde-se grande potencialidade de filtragem. Já o método que será apresentado trata de forma completa todo o desenvolvimento do projeto e implementação de um filtro shunt sintonizado.

As ferramentas de trabalho necessárias para qualquer tipo de análise e projeto de filtros são um programa computacional de simulação de circuitos elétricos e um programa de cálculos matemáticos. Para a seqüência de projeto utilizou-se os programas PSPICE 6.0 para simulação de circuitos elétricos e MATHCAD 6.0 para o desenvolvimento de cálculos matemáticos.

Inicialmente cabe lembrar as principais características que deve apresentar um bom projeto de filtros shunt sintonizados:

- (a) Deve-se utilizar sempre o maior valor de capacitância possível para o projeto dos filtros, pois isto leva ao aumento da banda de filtragem e diminui os riscos de perda de sintonia e amplificação de harmônicas.
- (b) Deve-se utilizar os menores valores de indutância possíveis, para que a qualidade de filtragem seja sempre a melhor possível.

Os passos gerais de projeto ficam assim descritos:

1 - Inicia-se o procedimento de projeto com a análise das formas de onda das três fases do sistema a ser corrigido. Com o auxílio de um osciloscópio digital ou de um analisador de espectro harmônico mede-se:

- A amplitude da fundamental e de todas as harmônicas de corrente de cada fase e do neutro da instalação.
- A amplitude da fundamental e de todas as harmônicas de tensão de cada fase da instalação
- O ângulo de deslocamento entre a corrente e a tensão fundamentais de cada fase.

2- Através dos dados de placa do transformador alimentador calcula-se os parâmetros R_s e L_s .

3 - Busca-se através dos dados da instalação o melhor modelo de simulação da carga verificada no sistema, com o uso elementos passivos (indutores, capacitores e resistores) e de elementos ativos (transistores, diodos, etc.), simulando o sistema até obter-se, com bom grau de precisão, as grandezas medidas do sistema real.

4 - Com o modelo de simulação desenvolvido inicia-se o processo de cálculo dos filtros.

5 - Com os dados obtidos simula-se o filtro conjuntamente ao modelo adotado para observar sua performance.

Os itens 1, 2 tratam apenas de coleta de informações, porém devem ser extremamente bem realizados, pois influem significativamente no projeto. No item 1 é necessário que sempre se faça uma série de medidas durante vários períodos de carga para que, através dos dados obtidos, caracterize-se o pior caso possível de distorção harmônica existente na instalação. No item 2 é necessária apenas uma boa análise dos dados técnicos do transformador.

O item 3 é extremamente importante, pois um modelo mal concebido da instalação pode levar a resultados teóricos que podem não apresentar a mesma performance na prática. Este item será posteriormente apresentado com maior ênfase.

O item 4 apresenta as especificações de projeto. O procedimento que será apresentado pode ser utilizado para filtragem em qualquer tipo de instalação, seja monofásica ou trifásica, equilibrada ou desequilibrada. Em instalações que apresentam elevado conteúdo harmônico desequilibrado, outros elementos podem ser utilizados, para melhora da performance dos filtros shunt sintonizados. Estes elementos e seu projeto serão posteriormente apresentados. Este tipo de instalação por apresentar-se atualmente como a de maior conteúdo harmônico e de maior grau de dificuldade em termos de filtragem, será apresentada em um capítulo separado deste estudo. Abaixo ilustra-se o procedimento geral de projeto, no qual será considerado uma estrutura trifásica balanceada.

Por fim o item 5 trata da verificação por simulação da resposta do sistema pós-filtragem, o qual deve ser um item indispensável do projeto.

1º. Passo: Determinação do fator de deslocamento e da capacitância geral que pode ser utilizada

O primeiro passo do projeto é calcular através dos dados de corrente e de tensão fundamentais (60 Hz) e do fator de deslocamento (θ), qual é o valor de capacitância que pode ser utilizado para o projeto dos filtros shunt sintonizados, de maneira a reduzir o valor da potência reativa indutiva do sistema e assim, fazer com que o fator de deslocamento ($\cos(\theta)$) atenda à norma vigente.

Com as medidas de corrente e tensão de uma das fases, e considerando o fator de deslocamento almejado de 0.98, determina-se:

$$\theta_{\text{NOM}} = \cos^{-1}(0,98) = 11,5^\circ \quad (2.30)$$

$$\theta = \theta_{\text{NOM}} - \theta_{\text{SIST}} \quad (2.31)$$

$$Q_{\text{REAT}} = V_{\text{ef}} \cdot I_{\text{ef}} \cdot \text{sen}(\theta) \quad (2.32)$$

$$Q_{\text{REAT}} = \frac{V_{\text{ef}}^2}{\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{EQ}}}} = V_{\text{ef}}^2 \cdot \omega \cdot C_{\text{EQ}} \quad (2.33)$$

Substituindo 2.31 em 2.32 obtém-se como resultado:

$$C_{\text{EQ}} = \frac{I_{\text{ef}} \cdot \text{sen}(\theta)}{\omega \cdot V_{\text{ef}}} \quad (2.34)$$

Este será o valor máximo de capacitância a ser utilizado no projeto. Os valores de corrente eficaz e de fator de deslocamento do sistema devem ser obtidos para a pior situação de carga.

2º. Passo: Distribuição da capacitância total obtida entre os filtros sintonizados

Com o valor da capacitância total determinado, deve-se distribuí-la entre todos os filtros a serem projetados. Para que não haja problemas de elevação da tensão nos casos de carga leve, deve-se sempre alocar entre 60 e 80% da capacitância total entre os filtros, a distribuição deste valor dependerá do número de filtros sintonizados a serem utilizados. Abaixo indica-se uma seqüência proposta pelo autor como valores iniciais de projeto:

Tabela 2.5 – Dados iniciais de locação de capacitância por filtro

Ordem do Filtro	Presença	Valor %						
3 ^a Harmônica	X	100	X	60	X	50	X	40
5 ^a Harmônica			X	40	X	30	X	30
7 ^a Harmônica					X	20	X	15
11 ^a Harmônica							X	15

Estes valores devem servir apenas como ponto de partida para o projeto de filtros shunt sintonizados, pois esta distribuição depende das características do sistema, sendo que alterações podem ser efetuadas nestes valores.

3º Passo: Cálculo dos Parâmetros do Filtro

Este é o passo mais importante no projeto de um bom filtro shunt sintonizado, no qual o projetista deve tomar os maiores cuidados possíveis. A principal diferença entre o processo de cálculo dos parâmetros apresentados neste trabalho, comparado com o método clássico, advém da iteração entre os valores teóricos encontrados com sua representatividade física em termos de confecção destes elementos, principalmente em termos da indutância.

O procedimento de projeto adotado foi desenvolvido através do uso do programa MATHCAD 6.0. Através da confecção de uma rotina de cálculos projeta-se os valores do filtro de menor ordem e em seguida calcula-se os parâmetros do indutor obtido. O processo de cálculo do indutor deve-se ao fato de que a resistência do filtro será praticamente composta pela resistência do enrolamento do indutor, e este parâmetro não deve ser aleatoriamente projetado, pois pode-se obter um valor teórico sem representatividade prática. Após verificar os parâmetros do indutor, deve-se voltar ao projeto e associar ao filtro um valor próximo ao encontrado. Cabe ressaltar que sempre é possível obter-se valores de resistência menores do que o inicialmente projetado, porém isto acarretará em maior peso e volume do indutor em comparação com o valor inicial calculado.

O procedimento de cálculo do indutor está apresentado no ANEXO II deste trabalho e o de cálculo dos parâmetros do(s) filtro(s) encontra-se detalhadamente descrito no ANEXO I.

Uma rápida descrição do procedimento de cálculo dos parâmetros está abaixo apresentada.

Com os valores adotados inicialmente para a frequência de ressonância e com o valor de capacitância a ser associada ao filtro determina-se o valor da indutância.

$$L_{SH} = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_o)^2 \cdot C_{SH}} \quad (2.35)$$

Com o valor da indutância, da capacitância e da corrente harmônica determina-se os valores das grandezas do indutor através dos cálculos apresentados no APÊNDICE I. Com o valor da resistência do enrolamento do indutor completa-se os parâmetros do filtro.

Com os parâmetros encontrados observa-se a resposta em frequência da impedância do filtro em relação à impedância do transformador. Caso o valor da resistência do filtro seja muito próxima à resistência do transformador deve-se aumentar a área do condutor do enrolamento, para que a resistência seja reduzida, porém com isto a área de janela do núcleo magnético será aumentada e, por conseguinte, o volume do indutor.

Caso a resistência do filtro apresente baixo valor, deve-se observar a banda de frequência em que a impedância do filtro encontra-se abaixo do valor da resistência do transformador. Quanto maior esta banda de frequência maior a capacidade de excursão da frequência de ressonância sem a perda da qualidade de filtragem, com menores riscos de haver perda de sintonia e amplificação harmônica. Como a ferramenta matemática oferece a capacidade gráfica, deve-se sempre visualizar o comportamento da impedância do transformador e do filtro em função da frequência.

Ao se projetar um novo filtro de frequência de ressonância superior, deve-se projetá-lo individualmente, como no projeto do primeiro filtro. Ao fim do projeto deve-se obter a função que determina a impedância de ambos os filtros conectados em paralelo e garantir em torno da frequência de ressonância um comportamento muito próximo do projetado individualmente. Com o auxílio da ferramenta computacional este processo torna-se de fácil desenvolvimento.

Observa-se, como salientado no início do capítulo, que a possibilidade de trabalhar-se com elevados valores de capacitância traz ao sistema de filtragem enormes vantagens, seja pelo aumento da faixa de excursão da frequência de ressonância, ou seja pela redução do grau de amplificação harmônica advinda da perda de sintonia.

4º Passo: Simulação do sistema na presença dos filtros

Ao fim de cada etapa de análise dos filtros sintonizados deve-se procurar simulá-los junto ao sistema, antes de projetar um novo filtro de frequência superior. Este fato advém da necessidade de garantir a boa qualidade de filtragem das frequências inferiores, para que não haja problemas de ressonância devido a projetos de parâmetros equivocados ou de modelos matemáticos inapropriadamente utilizados.

Observa-se que o procedimento de projeto a ser utilizado para uma boa qualidade de filtragem requer interatividade entre os valores teóricos e sua implementação prática, além de necessitar de um grau de refinamento considerável das variáveis de projeto. Na maior parte dos projetos industriais, ambos os processos de projeto apresentados, Kusko e Quadros, podem ser utilizados com boa performance. Cabe ressaltar que em instalações que possuam baixo fator de deslocamento, podem ocorrer grandes problemas ao proceder o uso do equacionamento proposto por Kusko [19], nestes casos o processo mais interativo será mais confiável e juntamente com novos elementos, os quais serão posteriormente apresentados, podem acarretar melhores resultados práticos.

Posteriormente será apresentado um exemplo de projeto desenvolvido através do novo equacionamento proposto, com a aferição de seus resultados através de simulações e verificação prática.

2.8 – Conclusão

Fica determinada a importância do completo conhecimento das características do filtro shunt sintonizado, como elemento fundamental para um adequado projeto de filtragem harmônica. Apresentou-se um novo processo de cálculo dos parâmetros deste filtro, o qual possibilita maior interatividade no processo de cálculo e maior possibilidade de obtenção de bons resultados em implementações práticas, especialmente em casos de instalações que apresentam baixo fator de deslocamento.

Capítulo 3 – Filtros de Bloqueio.

3.1 – Introdução

O princípio do uso de filtros shunt sintonizados, com o intuito de atenuar correntes harmônicas em instalações elétricas em geral, advém da tentativa de criar um caminho de baixa impedância para estas correntes em relação à impedância do sistema alimentador (transformador), ou seja, procura-se criar uma passagem onde a corrente encontrará menor dificuldade de retorno. Da mesma maneira pode-se pensar em estruturas que aumentem a dificuldade de passagem de correntes harmônicas para o alimentador, fazendo com que estas correntes sejam “obrigadas” a circular pelo caminho de menor impedância, neste caso, os filtros shunt sintonizados. Estas estruturas são denominadas filtros de bloqueio, sendo apresentadas neste capítulo. Os filtros de bloqueio são elementos que tratam de auxiliar a filtragem passiva realizada por filtros shunt sintonizados, porém nunca podendo substituí-los por completo. Neste capítulo serão apresentadas as estruturas de filtros de bloqueio que podem ser utilizadas em filtragem passiva, suas características de resposta e suas vantagens e desvantagens. Será também apresentado um novo conceito de células de filtragem, com suas denominações e caracterizações.

3.2 – Filtros de Bloqueio Paralelo

A primeira estrutura de bloqueio projetada na área de filtragem passiva de componentes harmônicas foi o filtro de bloqueio paralelo. Esta topologia surgiu devido ao princípio de associar-se ao sistema um elemento de elevada impedância, que trata de impedir a passagem de uma determinada componente harmônica. Este filtro compõe-se da associação em paralelo de um capacitor e de um indutor, que gera em uma determinada frequência, denominada de frequência de ressonância de bloqueio paralela (f_{obp}), elevada impedância, e nas demais frequências, baixos valores de impedância.

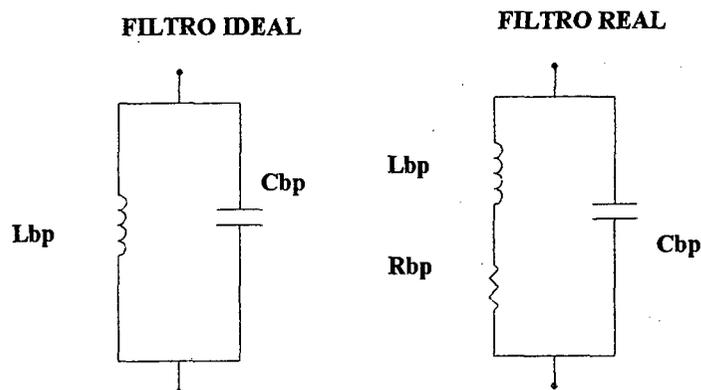


Figura 3.1 – Filtro de bloqueio LC paralelo ideal e real.

Esta estrutura apresenta uma caracterização simples em termos de análise, como pode ser observada.

Considerando uma estrutura ideal tem-se:

$$s = i \cdot \omega \quad (3.1)$$

Determina-se a expressão para a impedância do filtro:

$$Z_{bq}(s) = \frac{s \cdot L_{bp} \cdot \frac{1}{s \cdot C_{bp}}}{s \cdot L_{bp} + \frac{1}{s \cdot C_{bp}}} \quad (3.2)$$

$$Z_{bp}(s) = \frac{s \cdot L_{bp}}{(s^2 \cdot C_{bp} \cdot L_{bp} + 1)} \quad (3.3)$$

Determina-se a expressão do módulo da impedância do filtro:

$$|Z_{bp}(\omega)| = \frac{\omega \cdot L_{bp}}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot C_{bp} \cdot L_{bp})}} \quad (3.4)$$

No limite, quando o valor do denominador da equação (3.4) tender a zero, obtém-se:

$$\omega_{0bp} = \frac{1}{\sqrt{(L_{bp} \cdot C_{bp})}} \quad (3.5)$$

$$f_{0_{bp}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_{bp} \cdot C_{bp})}} \quad (3.6)$$

Desta forma, quando ω assumir o valor dado pela equação (3.5) o valor dado pela equação (3.4) tenderá a infinito. Esta frequência é determinada como sendo a frequência de ressonância do filtro de bloqueio paralelo ideal. O comportamento da equação (3.4), em função da frequência, é apresentado na figura 3.2, adotando os seguintes parâmetros como exemplo:

- $L_{bp} = 500 \mu\text{H}$
- $C_{bp} = 1,56\text{mF}$
- $f_{0_{bp}} = 180 \text{ Hz}$
- $R_{bp} = 100\text{m}\Omega$

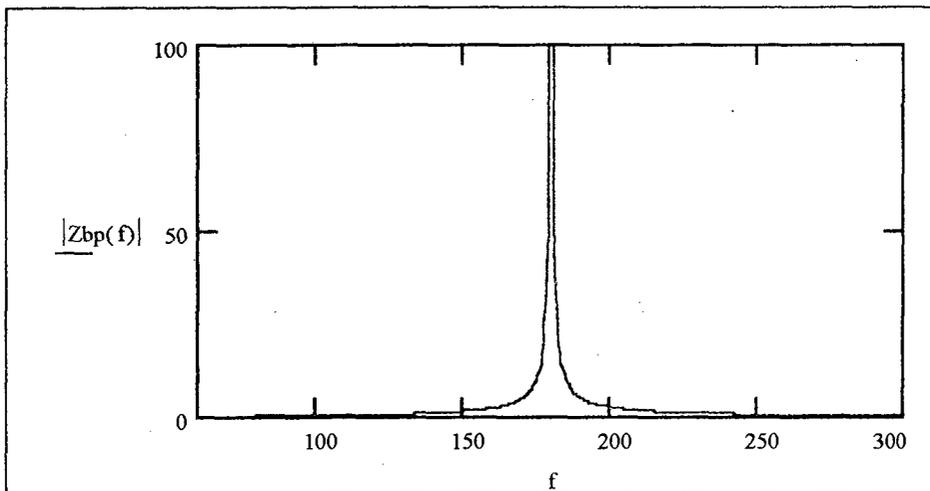


Figura 3.2 – Resposta em frequência do filtro de bloqueio paralelo ideal.

Observa-se que na frequência de ressonância do filtro, a impedância tenderá a um valor infinito, sendo praticamente nula nas demais frequências. Caracteriza-se ainda uma pequena banda de frequência onde há valores significativos de impedância.

Considerando uma estrutura real, determina-se o equacionamento do filtro.

Encontra-se a expressão que caracteriza a impedância do filtro:

$$Z_{bp}(s) = \frac{(s \cdot L_{bp} + R_{bp}) \cdot \frac{1}{s \cdot C_{bp}}}{s \cdot L_{bp} + R_{bp} + \frac{1}{s \cdot C_{bp}}} \quad (3.7)$$

$$Z_{bp}(s) = \frac{s \cdot L_{bp} + R_{bp}}{(s^2 \cdot C_{bp} \cdot L_{bp} + s \cdot R_{bp} \cdot C_{bp} + 1)} \quad (3.8)$$

Determina-se a expressão para o cálculo do módulo da impedância:

$$|Z_{bp}(\omega)| = \frac{\sqrt{((\omega \cdot L_{bp})^2 + R_{bp}^2)}}{\sqrt{((1 - \omega^2 \cdot C_{bp} \cdot L_{bp})^2 + (R_{bp} \cdot C_{bp})^2)}} \quad (3.9)$$

No limite, quando o valor do denominador da equação (3.9) tender a zero obtém-se:

$$\omega = \frac{-R_{bp} \cdot C_{bp} \pm \sqrt{(R_{bp}^2 \cdot C_{bp}^2 - 4 \cdot L_{bp} \cdot C_{bp})}}{2 \cdot L_{bp} \cdot C_{bp}} \quad (3.10)$$

Já a equação (3.8) não apresenta possibilidade de anular-se o denominador. Neste caso, inserindo a equação (3.5) na equação (3.9) obtém-se:

$$\omega_{0_{bp}} = \frac{\sqrt{\left(\frac{L_{bp}}{C_{bp}} + R_{bp}^2\right)}}{R_{bp} \cdot C_{bp}} \quad (3.11)$$

Fazendo com que $R_{bp} \rightarrow 0$ na equação (3.11), obtém-se um valor de impedância que tenderá a infinito, o que caracteriza a função de transferência do filtro de bloqueio ideal.

Observa-se que quando o valor da resistência equivalente de bloqueio for pequena, a frequência de ressonância do filtro pode ser considerada como sendo a mesma frequência apresentada na equação (3.5). Utilizando os mesmos valores do exemplo ilustrativo do filtro ideal, obtém-se a resposta gráfica da impedância do filtro dada pela equação (3.9), considerando uma resistência $R_{bp} = 50 \text{ m}\Omega$.

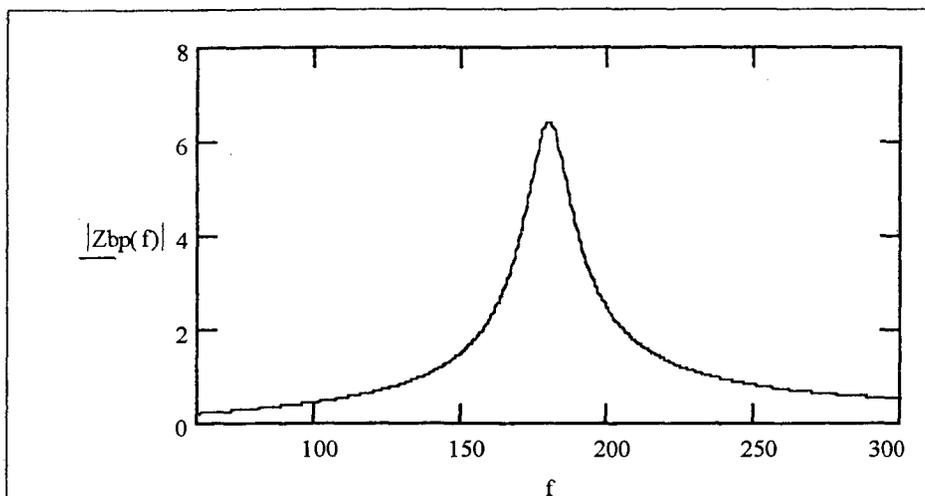


Figura 3.3 – Resposta em frequência do filtro de bloqueio paralelo real.

O que pode-se observar em relação as diferenças entre o comportamento do filtro de bloqueio ideal e o real, é que na situação real a impedância do filtro apresenta menor valor na frequência de ressonância do que a observada na situação ideal, além do que, o filtro de bloqueio ideal apresenta uma banda de frequência de atuação mais “estreita”, ou seja, a faixa de frequência onde a impedância do filtro é elevada é menor. No caso de projeto de filtros de bloqueio paralelo deve-se sempre utilizar o modelo real para qualquer análise, devido ao fato da resistência do enrolamento do indutor apresentar valores, de certa forma, consideráveis em termos de projeto.

Todo o filtro de bloqueio paralelo deve ser projetado conjuntamente com a inserção de um filtro shunt de mesma frequência, pois caso não haja um caminho de baixa impedância para a circulação das harmônicas, as mesmas passarão a circular obrigatoriamente pelo filtro de bloqueio, gerando elevadas distorções na tensão de fase do sistema.

Cabe destacar que, para um completo entendimento de como comporta-se o filtro de bloqueio paralelo, necessita-se conhecer como a influência da variação de parâmetros do filtro pode afetar a sua resposta em termos de sua impedância. Estes aspectos serão abordados a seguir.

3.2.1 – Variação dos Valores de L_{bp} e C_{bp} do Filtro de Bloqueio Paralelo

Para um completo entendimento do filtro de bloqueio paralelo deve-se observar como comporta-se a resposta em frequência de sua impedância em função da variação dos parâmetros L_{bp} e C_{bp} . Considera-se inicialmente a frequência de ressonância do filtro (f_{obp}) e sua resistência (R_{bp}) fixas em 180 Hz e 50mΩ. Variando os valores de L_{bp} de 100 a 500μH encontra-se o valor da capacitância do filtro, de tal forma que a equação (3.6) continue a ser satisfeita.

Tabela 3.1 – Valores de L_{bp} , C_{bp} e R_{bp} para um filtro de bloqueio paralelo.

Frequência de Ressonância	Indutância	Capacitância
180 Hz	100μH	7,82mF
180 Hz	200μH	3,91mF
180 Hz	300μH	2,60mF
180 Hz	400μH	1,95mF
180 Hz	500μH	1,56mF

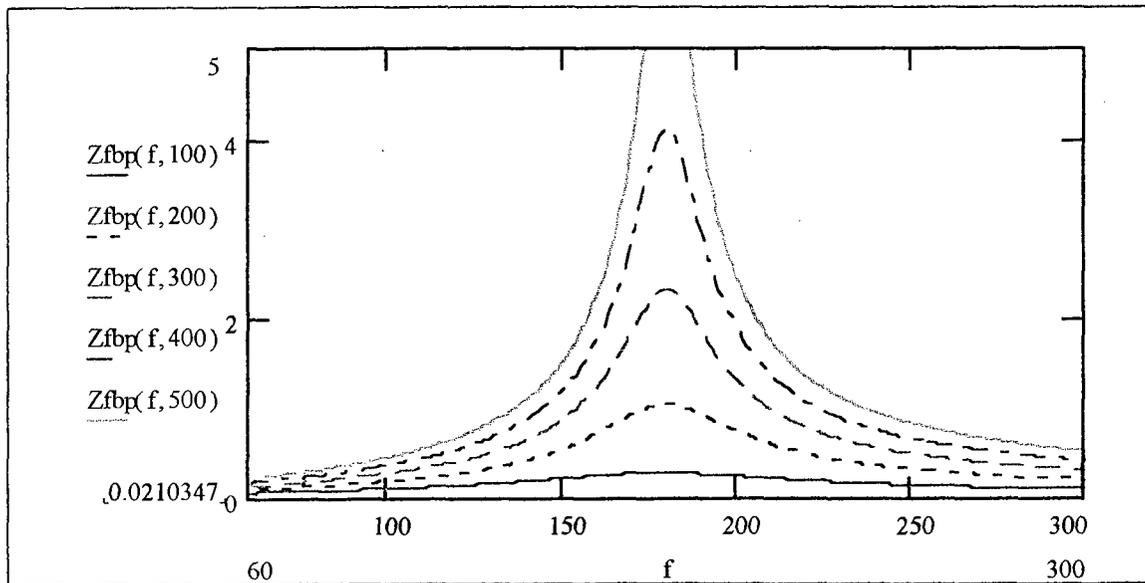


Figura 3.4 – Impedância do filtro de bloqueio LC paralelo para diferentes valores de L_{bp} e C_{bp} .

Observa-se que a medida que o valor da indutância L_{bp} aumenta, com a respectiva redução de C_{bp} , há um aumento da amplitude da impedância na frequência de ressonância, bem como um aumento da banda de frequência em que a impedância do filtro possui elevado valor. Com isto pode-se concluir que *quanto maior for o valor do indutor L_{bp}* ,

mais eficiente deve ser o filtro de bloqueio, pois maior será seu poder de impedir a passagem da harmônica de mesma frequência. Com esta constatação se poderia inicialmente concluir que um valor muito elevado de L_{bp} associado a um baixo valor de R_{bp} trataria de impedir por completo toda a circulação harmônica, de mesma frequência, pelo filtro de bloqueio. Alguns aspectos porém tratam de limitar o valor de indutância L_{bp} a ser utilizada em projetos de filtros de bloqueio paralelo, tais como:

- ✓ Caso haja circulação de elevada corrente fundamental pelo filtro de bloqueio, com completa eliminação da harmônica de mesma frequência do filtro, haverá uma grande queda de tensão sobre o mesmo, dada por $V_{bp} = 377 \cdot L_{bp} \cdot I_{60}$ e com isto quanto maior for a corrente fundamental (I_{60}), ou o valor da indutância (L_{bp}), maior será a queda de tensão sobre o filtro (V_{bp}), podendo acarretar níveis de subtensões abaixo dos valores mínimos aceitáveis de operação normal de um sistema elétrico;
- ✓ Com a elevação do valor da indutância aumenta-se a impedância em elevadas frequências devido ao aumento da banda de frequência do filtro. Com isso, caso hajam correntes harmônicas de frequências superiores a frequência de ressonância do filtro de bloqueio, as quais não estejam sendo filtradas, pode ocorrer a elevação da distorção harmônica da tensão do sistema;
- ✓ Caso haja a perda de um dos filtros shunt sintonizados, parte da corrente harmônica de mesma frequência do filtro de bloqueio (I_{o_bp}) obrigatoriamente circulará pelo mesmo, fazendo com que a queda de tensão $V_{bp} = \omega_{o_bp} \cdot L_{bp} \cdot I_{o_bp}$ alcance um nível tal, que a distorção harmônica de tensão seja extremamente elevada, podendo acarretar atuação da proteção do sistema.

Diante destes fatos fica clara a posição de que não se deve utilizar valores extremamente elevados de indutância com o intuito de aumentar o bloqueio no caminho das harmônicas, apresentado pelo filtro de bloqueio paralelo. Baixos valores de indutância podem em muitos sistemas representar elevados níveis de bloqueio, desde que sejam

projetados com base nos filtros shunt sintonizados utilizados previamente para filtragem. *Conclui-se que o filtro de bloqueio paralelo encontra-se bem adaptado para sistemas de baixa e média potência.*

3.2.2 – Variação do Valor de R_{bp} do Filtro de Bloqueio Paralelo

Da mesma maneira que observou-se como a variação dos parâmetros L_{bp} e C_{bp} altera a resposta da impedância do filtro em função da frequência do sistema, deve-se observar como a variação da resistência R_{bp} pode afetar a mesma resposta.

Inicia-se fixando um valor constante para o par L_{bp} e C_{bp} , de tal forma que $f_{obp} = 180$ Hz. Neste caso escolhe-se $L_{bp} = 500\mu\text{H}$ e $C_{bp} = 1,56\text{mF}$. O valor da resistência R_{bp} variará de 20 a $100\text{m}\Omega$, em passos de $20\text{m}\Omega$. Os valores citados são inseridos na equação (3.9) resultando no conjunto de curvas apresentadas na figura 3.5.

Tabela 3.2 – Valores de L_{bp} , C_{bp} e R_{bp} para Um filtro de bloqueio paralelo.

Frequência	Indutância	Capacitância	Resistência
180 Hz	$500\mu\text{H}$	$1,56\text{mF}$	$20\text{m}\Omega$
180 Hz	$500\mu\text{H}$	$1,56\text{mF}$	$40\text{m}\Omega$
180 Hz	$500\mu\text{H}$	$1,56\text{mF}$	$60\text{m}\Omega$
180 Hz	$500\mu\text{H}$	$1,56\text{mF}$	$80\text{m}\Omega$
180 Hz	$500\mu\text{H}$	$1,56\text{mF}$	$100\text{m}\Omega$

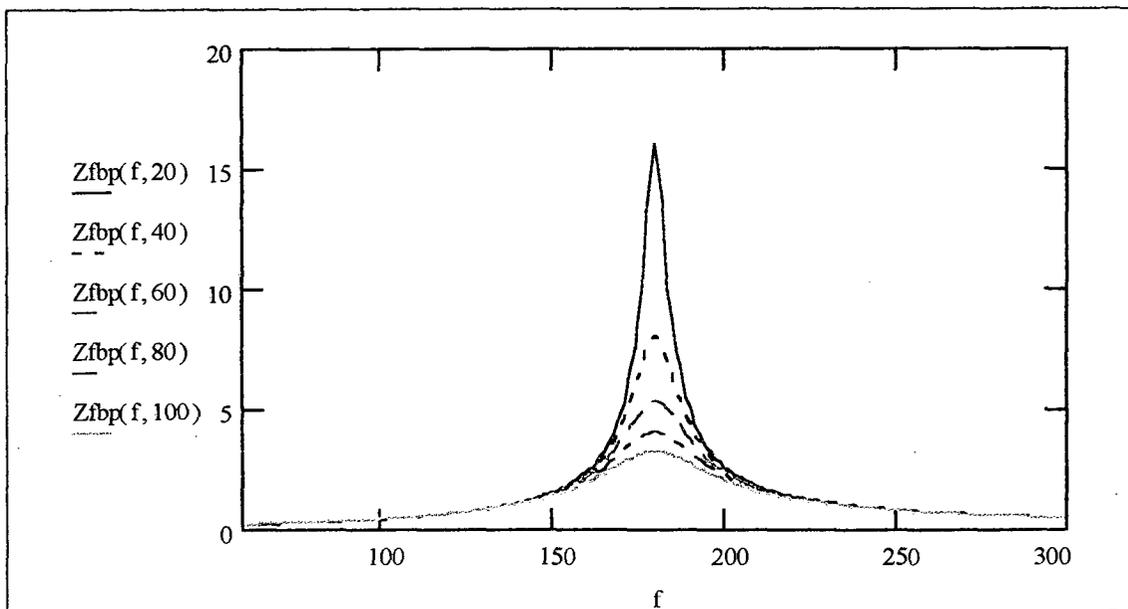


Figura 3.5 – Impedância do filtro de bloqueio LC paralelo para diferentes valores de R_{bp} .

Com a variação do parâmetro R_{bp} observa-se as seguintes características:

- (a) A variação da resistência não acarreta um aumento ou uma redução da largura de banda do filtro.
- (b) O aumento da resistência leva a redução da impedância do filtro em torno da sua frequência de ressonância. Do mesmo modo, a redução da resistência acarreta em um aumento da impedância do filtro em torno de sua frequência de ressonância.

Baixos valores da resistência de bloqueio somente podem ser alcançadas com o aumento da área de seção do(s) condutor(es) que forma(m) o enrolamento do indutor e, para tanto, pode-se necessitar um aumento de área da janela do indutor, acarretando um aumento do peso e volume do mesmo. Um aumento significativo no poder de bloqueio do filtro pode portanto, acarretar aumento de seus custos de implementação.

3.2.3 – Métodos para Aplicação do Filtro de Bloqueio Paralelo

Existem duas maneiras diferentes de utilizar a estrutura de bloqueio paralelo:

1ª. – Utilizar o filtro de bloqueio paralelo na fase do sistema, logo após o alimentador (transformador). Este filtro é denominado *filtro de bloqueio paralelo de fase*.

2ª. – Utilizar o filtro de bloqueio paralelo ligado ao neutro do sistema. Este filtro é denominado *filtro de bloqueio paralelo de neutro*.

Ambas as alternativas apresentam vantagens e desvantagens, porém continuam com o mesmo princípio de funcionamento, bloquear as harmônicas que circulam na instalação

A seguir trata-se de detalhar cada uma destas metodologias.

3.2.3.1 – O Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase

Esta é a estrutura mais conhecida em termos de bloqueio de harmônicas. Seu princípio é o de bloquear as harmônicas na fase do sistema. Esta estrutura apresenta as mesmas características citadas anteriormente para o filtro de bloqueio paralelo genérico.

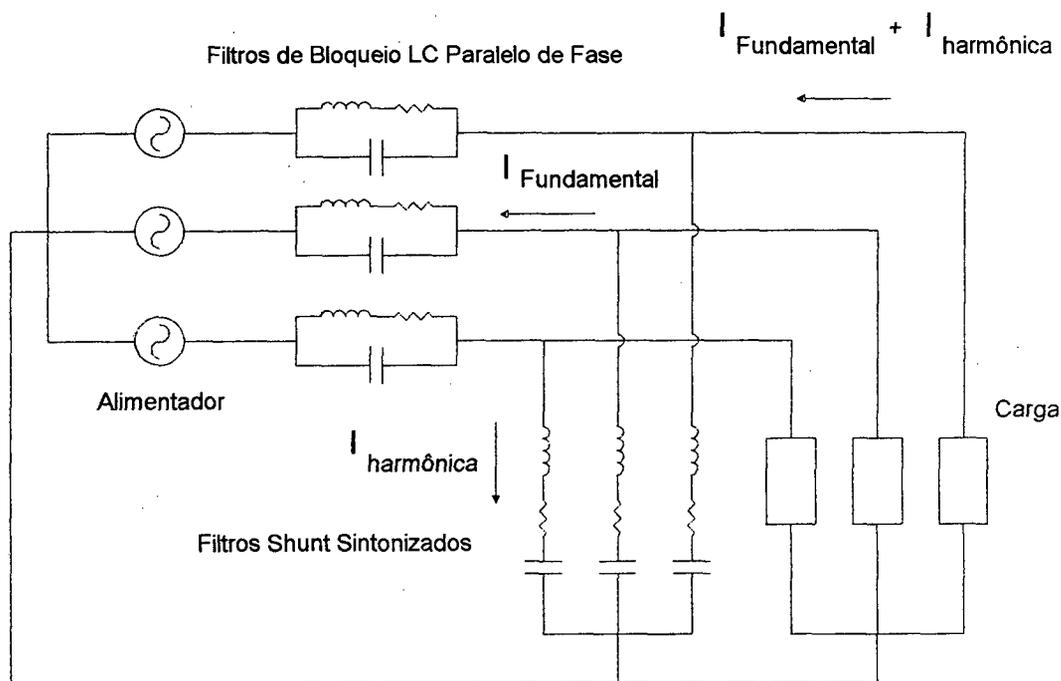


Figura 3.6 – Filtro de bloqueio LC paralelo de fase em um sistema trifásico equilibrado.

Como todas as topologias de bloqueio, a colocação do filtro de bloqueio na fase necessita da presença de um filtro shunt de mesma frequência. Sua principal característica é a de apresentar um bloqueio efetivo da componente harmônica, sem que haja praticamente nenhuma circulação desta para o alimentador, mas somente pelo filtro shunt sintonizado.

Como o filtro está sendo colocado na fase do sistema, toda a corrente de fase acaba por circular pelo indutor. Neste caso, mesmo com baixos valores de indutância, pode-se chegar a elevados valores de peso e volume do indutor, devido ao enorme valor de corrente a que o filtro está submetido (elevada potência).

As quedas de tensão sobre o filtro de bloqueio paralelo de fase podem ser considerados os fatores fundamentais que limitam a utilização deste elemento, seja pela queda de tensão em função da corrente fundamental (60 Hz) ou de suas harmônicas não filtradas ($n \times 60$).

3.2.3.2 – O Filtro de Bloqueio Paralelo de Neutro

Outra forma de utilizar o filtro de bloqueio paralelo para impedir a circulação de harmônicas é o de aloca-lo no neutro do sistema. Neste caso somente as componentes harmônicas que circulam pelo neutro podem ser bloqueadas pelo filtro.

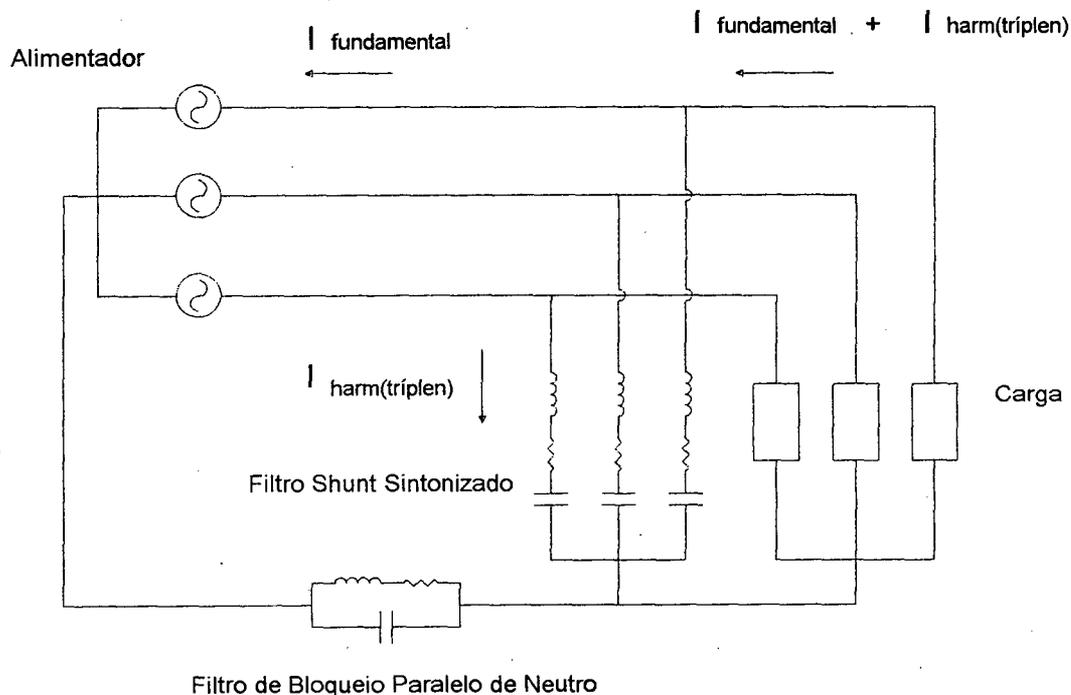


Figura 3.7 – Filtro de Bloqueio LC Paralelo de Neutro em um Sistema Trifásico Equilibrado.

Somente em duas situações podem ocorrer circulação de harmônicas pelo neutro do sistema:

- 1) Em sistemas trifásicos equilibrados caracterizados pela presença de cargas monofásicas, onde as harmônicas tríplens (múltiplas de três em relação a fundamental) circulam pelo neutro.
- 2) Em sistemas trifásicos desequilibrados, onde as componentes harmônicas não-tríplens apresentem desbalanços em módulo ou em fase entre si, ocasionando o surgimento de componentes harmônicas no neutro.

No primeiro caso, sistemas trifásicos equilibrados com cargas de característica monofásica, as harmônicas tríplens naturalmente circulam pelo neutro do sistema, devido ao fato de possuírem a mesma fase entre si. As correntes harmônicas tríplens que circularão pelo neutro serão a soma dos módulos das correntes harmônicas tríplens das três fases. Em sistemas equilibrados, as demais harmônicas (não-tríplens) se anulam, devido a diferença de fase entre as componentes trifásicas ser de 120 graus.

No segundo caso as correntes tríplens que circulam pelo neutro sofrem redução, devido a existência de diferença de fase e módulo entre as componentes das três fases. Este fato também ocorre com as harmônicas não-tríplens, pois suas diferenças de fase não mais serão de 120 graus e seus módulos não serão idênticos entre si. Nos casos em que há desequilíbrios muito acentuados entre fases e módulos das harmônicas, pode ser vantajoso o uso de um filtro de bloqueio no neutro para harmônicas não tríplens, porém este caso inicialmente apresenta poucas chances de realmente vir a ocorrer em um sistema elétrico de baixa tensão, pois um elevado desbalanço harmônico entre fases pode ser solucionado com remanejamento de cargas, na procura de um melhor equilíbrio harmônico.

Como a corrente fundamental que circulará pelo neutro do sistema é geralmente muito menor do que a corrente de fase, a queda de tensão sobre o filtro será muito pequena. Portanto nos casos em que o sistema apresente bom equilíbrio entre as fases, a colocação de um filtro de bloqueio no neutro para atenuar a terceira harmônica pode ser extremamente vantajoso.

3.2.4 – Projeto de Filtros de Bloqueio Paralelo

Os filtros de bloqueio paralelo são os elementos que apresentam a maior facilidade de implementação em relação aos filtros de bloqueio em geral. Para tal, foi desenvolvida uma série de equações que tratam de possibilitar o pleno projeto dos elementos constituintes deste filtro. Os fatores necessários para projeto estão abaixo listados:

f_f – Frequência de ressonância do filtro

R_s – Resistência do filtro shunt de mesma frequência de ressonância

k – Fator de Bloqueio

R_b – Resistência do filtro de bloqueio

V_o – Tensão eficaz de fase do sistema

I_o – Corrente eficaz de fase do sistema

O fator k pode assumir valores de 5 à 20. Este fator expressa a qualidade de bloqueio do filtro, quanto maior seu valor, mais eficaz será a tarefa de bloquear a passagem da harmônica.

A resistência do filtro shunt, de mesma frequência do filtro de bloqueio, já encontra-se pré-determinada no projeto deste filtro.

A resistência do filtro de bloqueio deve ser tomada entre $3m\Omega$ à $5m\Omega$. Indica-se tomar como valor padrão de projeto o valor de $5m\Omega$. A variação deste fator é pouco significativa se reduzido em relação ao valor apresentado como padrão.

Calcula-se primeiramente os seguintes valores:

$$\omega_o = 0,95 \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot ff \quad (3.12)$$

$$L_{bq} = \frac{\sqrt{(-0,554R_b^2 + 5,2610^3 \cdot k^2 \cdot R_s^2)}}{\omega_o^2} + 0,55 \sqrt{\frac{(R_b^2 \cdot \omega_o^2 - 9,510^3 \cdot k^2 \cdot R_s^2 \cdot \omega_o^2)^2 + 3,25\omega_o^4 \cdot k^2 \cdot R_s^2 \cdot R_b^2}{\omega_o^4}} \quad (3.13)$$

Após utilizar ambas as equações é necessário que o valor encontrado para L_{bq} satisfaça a equação abaixo apresentada:

$$L_{bq-tt} \leq \frac{V_o}{7540 \cdot I_o} \quad (3.14)$$

Onde:

$$L_{bq-tt} = \sum_{i=1}^n L_{bq_i} \quad (3.15)$$

Sendo que:

n – Número de filtros de bloqueio do sistema

L_{bq_i} – Indutância calculada para cada filtro

L_{bt-tt} – Soma dos valores de indutância dos filtros de bloqueio

Caso o valor encontrado de L_{bq} não satisfaça a equação (3.14) deve-se retornar a equação (3.12) e recalculer o valor de L_{bq} , porém utilizando um valor menor para o fator de bloqueio k . Em casos que mais de um filtro de bloqueio seja projetado, deve-se sempre somar o valor encontrado da indutância de cada filtro (L_{bq_i}), de acordo com a equação (3.15), antes de inseri-las diretamente na equação (3.14).

O equacionamento apresentado pode ser utilizado para projetar todos os filtros de bloqueio paralelo, seja de fase ou de neutro, sendo válido para todas as frequências de projeto desejadas.

3.3 – Filtro de Bloqueio Série

3.3.1 – Princípio de Funcionamento

Uma nova possibilidade de filtragem em termos de bloqueio de harmônicas é o uso de um filtro de bloqueio série.

Seu funcionamento parte do mesmo princípio adotado em longas linhas de transmissão de energia, onde o elevado valor de indutância das mesmas limitaria o máximo fluxo de potência (energia) que poderia ser transmitido, acarretando também aumento da queda de tensão sobre a linha. O fluxo é determinado pela equação:

$$S_L = \frac{V_1 \cdot V_2 \cdot \text{sen}(\theta)}{X_L} \quad (3.16)$$

Sendo:

V_1 – Tensão na Barra 1

V_2 – Tensão na Barra 2

θ – Diferença angular entre as duas barras

X_L – Impedância da linha

Observa-se que elevados valores de indutância significarão menores valores de fluxo. Para tal, colocam-se capacitores série na linha, para que a impedância X_L seja reduzida e o fluxo máximo pela mesma aumentado. Este princípio é adotado nas linhas de 750 kV que interligam a usina de Itaipu e o Sistema Sudeste. Em todos os três circuitos são utilizados capacitores série. O valor adotado de capacitância não anula completamente a impedância reativa da linha, pois o caráter reativo indutivo é importante para que consiga-se também controlar os níveis de tensão em carga leve, caracterizando também o fato de não haver melhora significativa em termos econômicos ao anular-se por completo a reatância da linha. Constata-se que o princípio de inserção de capacitores série já é um fato difundido no meio prático e acadêmico.

O outro princípio utilizado na confecção do filtro de bloqueio série também possui fundamentos práticos e teóricos. Quando há em um sistema grande conteúdo de harmônicas de corrente, o primeiro passo na tentativa de reduzir o conteúdo harmônico seria o de inserir na fase do sistema um reator, reduzindo as derivadas de corrente e, por consequência, o fator de distorção harmônica. Este princípio possui dois grandes inconvenientes. O primeiro refere-se a perda de regulação pois, mesmo com baixa frequência fundamental do sistema (60Hz), a queda de tensão sobre o reator é elevada, proporcionalmente ao aumento do reator (indutor). O segundo problema advém da redução da capacidade de curto-circuito da instalação, o que prejudica a proteção do sistema, como também levaria a necessidade de aumentar a qualidade de filtragem, para enquadrar-se dentro da norma IEEE 519. Inicialmente este processo não apresenta grandes vantagens práticas.

Desta forma iniciou-se a tentativa de mesclar as características desejáveis de ambas as estruturas, ou seja, aproveitar o poder de bloqueio do reator de linha e a compensação oferecida pelos capacitores série. A estrutura recebeu o nome de filtro de bloqueio série, por ser fundamentalmente a associação de um indutor em série com um capacitor equivalente.

A estrutura do filtro de bloqueio série é idêntica a do filtro shunt sintonizado, porém sintoniza-se o filtro na frequência fundamental do sistema, ou seja, 60 Hz. Com isto o sistema somente “verá” a resistência equivalente do filtro na frequência fundamental, que possui por princípio baixo valor. Com isto não haverá redução da capacidade de curto-circuito da instalação, não comprometendo a proteção e tão pouco aumentando o nível de

filtragem estabelecido em norma. Desta forma é possível associar elevado poder de bloqueio com reduzidas perdas de regulação.

Considerando um sistema com presença de harmônicas, o filtro de bloqueio série idealmente caracteriza-se por um caminho de elevada impedância para todas as frequências acima da fundamental, possibilitando a total filtragem das harmônicas pelos filtros shunt sintonizados.

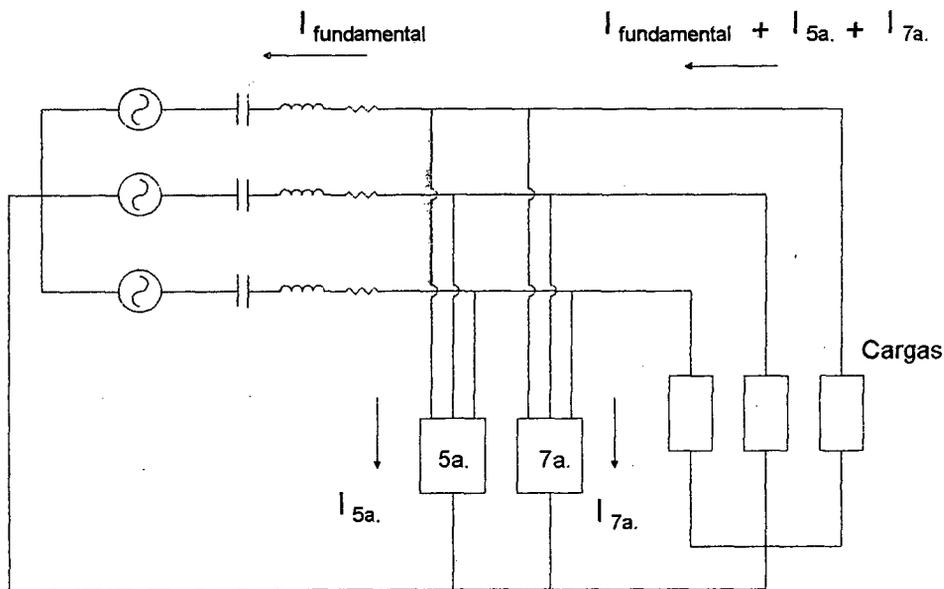


Figura 3.8 – Filtro de bloqueio série associado a filtros shunt sintonizados de 5a e 7a harmônicas.

Um dos maiores problemas apresentados pelo filtro de bloqueio relaciona-se a seu peso/volume. Teoricamente para aumentar-se o poder de bloqueio do filtro, deve-se elevar o valor da indutância, acarretando então maior peso/volume. Além deste fato estará sendo armazenada maior energia sobre o filtro, definida pela equação (3.17), apresentando-se diretamente proporcional ao valor da indutância e ao quadrado da corrente.

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \tag{3.17}$$

Como a energia de um circuito magnético possui limitações volumétricas, ou seja, um valor máximo de energia por cm^3 , o aumento da energia ocasionará aumento do volume e conseqüentemente do peso do indutor. Mesmo com esta desvantagem, o filtro de bloqueio série pode apresentar-se como uma boa alternativa principalmente em dois casos:

1 – Em sistemas de elevada potência instalada onde haja um valor extremamente elevado de distorção harmônica de corrente, associado a elevados valores de fator de deslocamento e a elevada potência instalada no sistema.

2 – Em sistemas de elevada potência instalada onde haja um valor elevado de distorção harmônica e necessite-se que tanto a corrente quanto a tensão pós-filtragem sejam perfeitamente senoidais.

Em ambos os casos pode-se citar que a filtragem passiva utilizando somente filtros shunt sintonizados apresentaria elevada dificuldade de atender os requisitos de projeto. Para tanto a estrutura de bloqueio série apresenta-se como sendo uma boa alternativa de auxílio a filtragem passiva convencional (filtros shunt sintonizados).

O filtro de bloqueio série apresenta-se portanto como uma nova estrutura para o uso em projetos de filtragem passiva, porém com restrições de uso.

3.3.2 – Caracterização do Filtro de Bloqueio Série

O filtro de bloqueio série baseia-se na estrutura do filtro shunt sintonizado. A grande diferença existente entre ambos é que a frequência de ressonância do filtro de bloqueio série é fixa em 60 Hz, tornando deste modo muito baixo o valor de impedância do filtro na frequência fundamental e elevados valores para frequências mais elevadas.

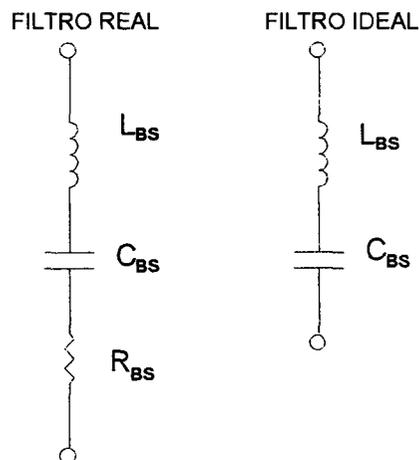


Figura 3.9 – Filtro de bloqueio LC série real e ideal.

Todo o desenvolvimento matemático do filtro de bloqueio série coincide com o do filtro shunt sintonizado. Deste modo obtém-se:

Impedância do Filtro:

$$Z_{bs}(\omega) = R_{bs} + i \cdot \omega \cdot L_{bs} + \frac{1}{i \cdot \omega \cdot C_{bs}} \quad (3.18)$$

Módulo da Impedância do Filtro:

$$|Z_{bs}(\omega)| = \sqrt{R_{bs}^2 + \left(\omega \cdot L_{bs} - \frac{1}{\omega \cdot C_{bs}} \right)^2} \quad (3.19)$$

A frequência de ressonância fica estabelecida como:

$$\omega\omega_{bs} = \frac{1}{\sqrt{L_{bs} \cdot C_{bs}}} \quad (3.20)$$

$$f\omega_{bs} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{bs} \cdot C_{bs}}} \quad (3.21)$$

Substituindo (3.16) em (3.15) obtém-se:

$$|Z_{bs}(\omega\omega_{bs})| = R_{bs} \quad (3.22)$$

Com a impedância do filtro sendo apenas a resistência do enrolamento do indutor na frequência de ressonância, a queda de tensão sobre o mesmo é muito pequena, devido ao fato da corrente eficaz ser determinada em grande parte pela corrente fundamental do sistema. Cabe destacar que a queda de tensão sobre cada elemento do filtro (L_{bs} e C_{bs}) será maior na medida em que o valor de indutância seja elevada, mesmo com pequenas quedas de tensão sobre o conjunto como um todo.

Como exemplo ilustra-se a resposta em frequência da equação (3.19) para um caso hipotético de um filtro de bloqueio com os seguintes valores:

- $L_{bs} = 1 \text{ mH}$
- $C_{bs} = 7 \text{ mF}$
- $R_{bs} = 10 \text{ m}\Omega$

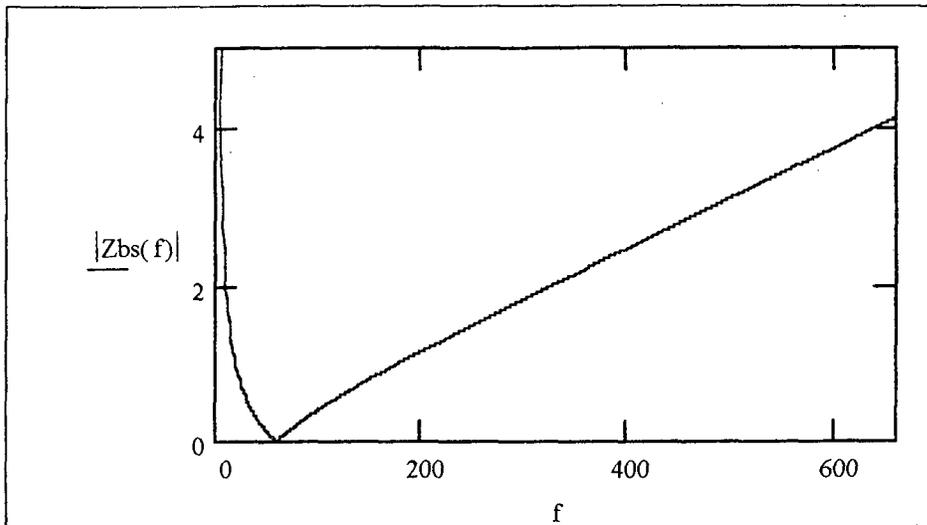


Figura 3.10 – Impedância do filtro de bloqueio série.

O bloqueio das frequências acima da fundamental deve-se somente a atuação do indutor, uma vez que em frequências acima da frequência de ressonância há a predominância de sua resposta. Desta forma quanto maior o valor da indutância, maior será o poder de bloqueio do filtro série e respectivamente menor será a capacitância a ser utilizada.

3.3.3 – Variação dos Valores de L_{bs} , C_{bs} e R_{bs} do Filtro de Bloqueio Série

Um dos pontos importantes para análise do filtro de bloqueio série é o de verificar seu comportamento diante da variação de seus parâmetros. Toma-se como exemplo uma série de valores de L_{bs} e C_{bs} , com o intuito de observar como o aumento da indutância afeta a resposta de impedância do filtro. Para este caso mantém-se o valor de R_{bs} fixo em $50\text{m}\Omega$.

Tabela 3.3 – Valores de L_{bs} e C_{bs} para um filtro de bloqueio série.

Frequência de Ressonância	Indutância	Capacitância	Resistência
60Hz	500 μH	14070 μF	50m Ω
60Hz	1000 μH	7040 μF	50m Ω
60Hz	1500 μH	4690 μF	50m Ω
60Hz	2000 μH	3520 μF	50m Ω

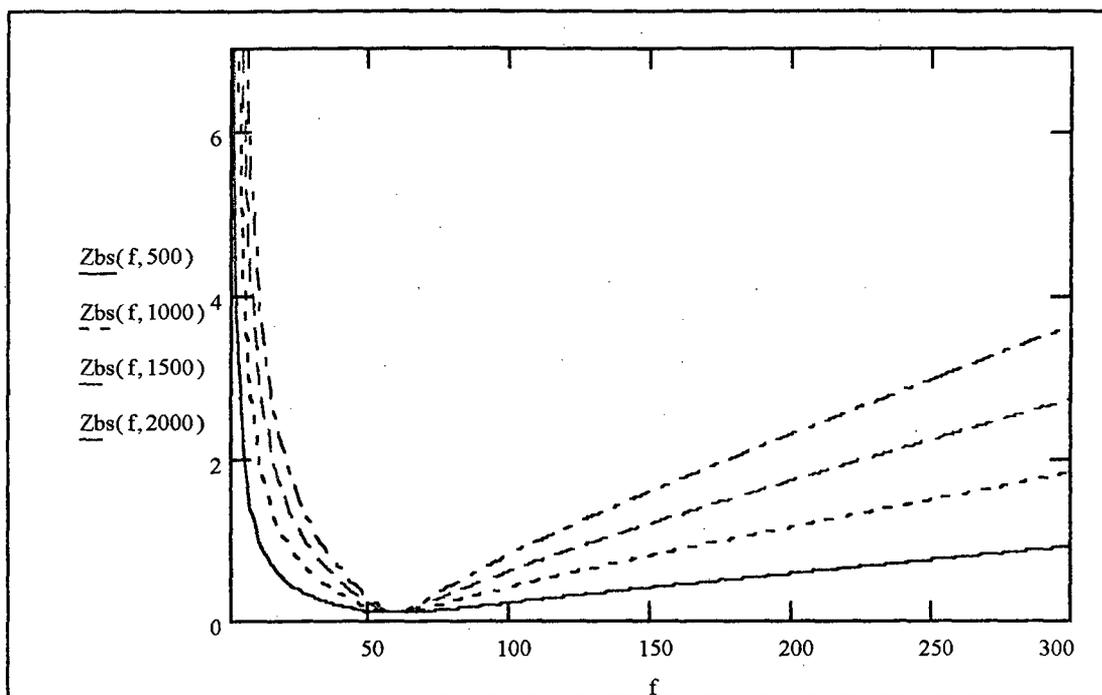


Figura 3.11 – Resposta obtida para variações obtidas em filtros de bloqueio série.

Confirma-se que o aumento da indutância do filtro acarreta em um aumento da impedância do mesmo em elevadas frequências, sem que haja variação de sua impedância na frequência fundamental (60 Hz).

Um dos fatos interessantes após esta breve análise é de que enquanto para filtros shunt sintonizados um aumento da indutância caracteriza perda de qualidade de filtragem, nos filtros de bloqueio esta característica encontra-se inversamente definida, ou seja, o aumento da indutância acarreta melhora significativa da característica de bloqueio.

A grande desvantagem em aumentar-se o valor da indutância constitui-se no aumento do seu peso e volume, com conseqüente aumento das perdas magnéticas e redução do rendimento do filtro.

Como visto para os filtros shunt sintonizados, a variação da resistência do filtro não acarreta nenhum tipo de perda de sintonia. Porém, pelo elevado valor das correntes que circulam pelo filtro, deve-se sempre projetar baixos valores de resistência para os enrolamentos do indutor, com o intuito de diminuir a queda de tensão sobre o filtro e de reduzir suas perdas ôhmicas. Uma vez que a corrente que circulará pelo indutor será a corrente nominal do sistema, exige-se que a resistência calculada deva apresentar baixos valores.

3.3.4 – Possibilidades de Utilização do Filtro de Bloqueio Série

Há duas possibilidades de utilização do filtro de bloqueio série:

1ª.Possibilidade: Inserir o filtro de bloqueio série entre a saída da fase do alimentador e o(s) filtro(s) shunt sintonizado(s). Neste caso toda a corrente fundamental da instalação acabará por circular pelo filtro de bloqueio série.

2ª. Possibilidade: Inserir o filtro de bloqueio no neutro do sistema. Somente o desequilíbrio de corrente na frequência fundamental tenderá a circular pelo filtro.

A segunda possibilidade de utilização deste filtro não apresenta nenhuma vantagem em termos de bloqueio se comparada com a estrutura de bloqueio paralela, devido ao fato de que o indutor do filtro de bloqueio paralelo apresenta um valor extremamente menor, para a mesma capacidade de bloqueio, do que a apresentada pelo filtro de bloqueio série. Isto significa grande redução de peso e volume, com conseqüente redução de custos de implementação. É importante salientar que mesmo que haja grande circulação de harmônicas no neutro, as de maior predominância sempre serão as harmônicas tríplens, assim não mais que duas frequências necessitarão ser bloqueadas no neutro (3ª e 9ª harmônicas), fazendo com que não haja necessidade de bloqueio de todas as harmônicas por um único filtro.

A primeira possibilidade de utilização do filtro de bloqueio série pode ser empregada para substituir a estrutura de bloqueio paralela, devido ao fato de que o filtro de bloqueio série fará com que todas as frequências acima da fundamental observem o filtro como um caminho de elevada impedância, com aumento proporcional ao aumento da frequência das harmônicas. Esta possibilidade de utilização do filtro de bloqueio série, combinada com adequado projeto de filtros shunt sintonizados, pode representar a possibilidade de completa filtragem de qualquer conteúdo harmônico existente, obtendo correntes e tensões praticamente senoidais ($TDH_{corrente} < 0,5\%$ e $TDH_{tensão} < 1\%$).

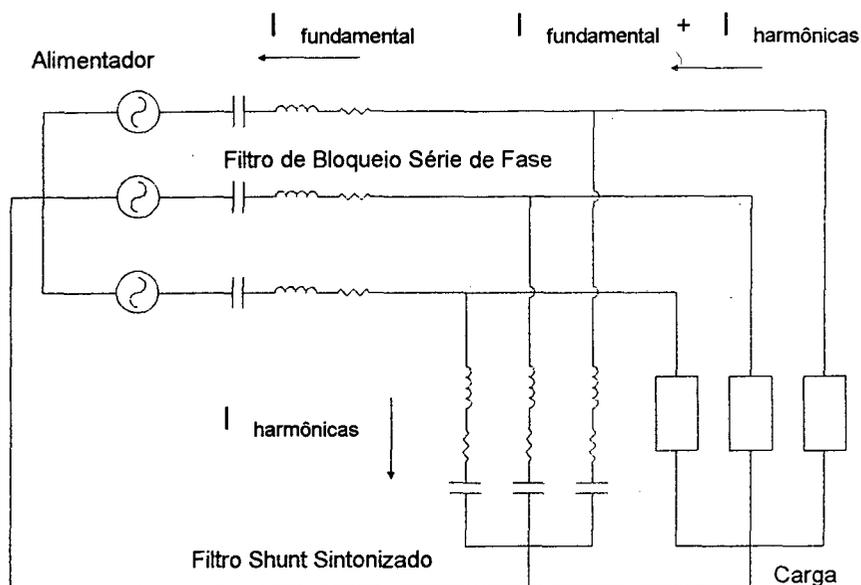


Figura 3.12 – Esquema de atuação do filtro de bloqueio série de fase.

Alguns problemas também podem ser citados em relação à utilização do filtro de bloqueio série na fase de um sistema:

- (a) Para que haja a possibilidade de filtragem de todo o conteúdo harmônico de uma instalação, será necessário grande volume e peso do indutor do filtro de bloqueio série, podendo alcançar até 1/3 do volume do alimentador (transformador).
- (b) Deve-se projetar o capacitor de forma a que possa suportar curto-circuitos de curta e média duração, até que a proteção do sistema atue. Caso este fato não seja observado, pode-se perder todos os capacitores utilizados na montagem do capacitor série equivalente.

Os filtros de bloqueio série possibilitam portanto vantagens em termos de novas possibilidades do uso de elementos passivos para filtragem harmônica e desvantagens em termos de sua aplicação prática. Esta topologia merece investigação futura mais aprofundada, devido a envolver elevadas potências, e de possuir características ainda desconhecidas em instalações de baixa frequência com elevado conteúdo harmônico, uma vez que não foi possível encontrar algo sobre o mesmo na literatura técnica. As simulações computacionais realizadas mostraram inicialmente excelentes resultados, mas este estudo não foi aprofundado.

Cabe destacar que o fator mais importante é o de apresentar o filtro de bloqueio como uma nova estrutura de filtragem, possibilitando que novos estudos possam ser realizados sobre esta topologia.

3.4 – Conceito de Célula de Bloqueio

Após definidas as estruturas de bloqueio passíveis de serem utilizadas em filtragens passivas de harmônicos, insere-se o princípio da célula de filtragem.

Como os filtros de bloqueio não podem ser alocados unicamente como forma de bloqueio e filtragem de harmônicos, é sempre necessário o uso de filtros shunt sintonizados. Por este motivo pode-se denominar ambas as estruturas conjuntamente utilizadas como uma estrutura híbrida, ou ainda definir o que denomina-se como *célula de filtragem*.

Vários tipos de células de filtragem podem ser obtidas adotando diferentes maneiras de associar-se filtros shunt sintonizados e filtros de bloqueio, apresentando sempre dois elementos, o elemento bloqueador e o elemento condutor.

As células básicas de filtragem podem ser assim classificadas, em termos de seus elementos:

CÉLULA	ELEMENTO BLOQUEADOR	ELEMENTO CONDUTOR
I	Sem Elemento Bloqueador	Filtro Shunt Sintonizado
II	Filtro de Bloqueio Série de Fase	Filtro Shunt Sintonizado
III	Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase	Filtro Shunt Sintonizado
IV	Filtro de Bloqueio Paralelo de Neutro	Filtro Shunt Sintonizado
V	Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase e Neutro	Filtro Shunt Sintonizado

Várias células de bloqueio podem ser visualizadas com o uso das estruturas apresentadas neste capítulo, porém as células de filtragem básicas encontram-se ilustradas nas figuras 3.13 à 3.17.

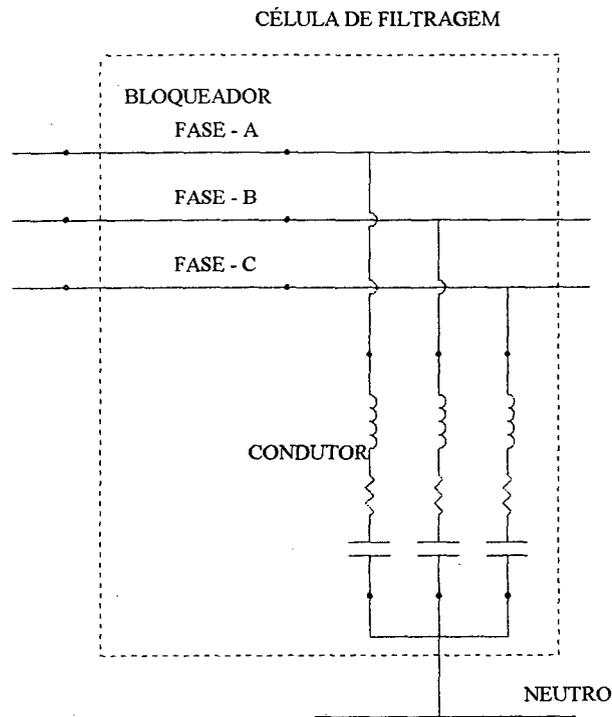


Figura 3.13 – Célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado (Célula I).

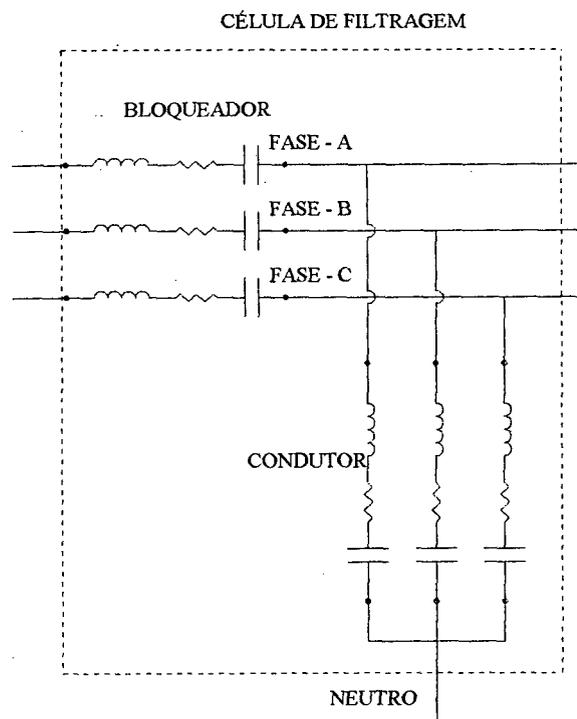


Figura 3.14 - Célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado e filtro de bloqueio série de fase (Célula II).

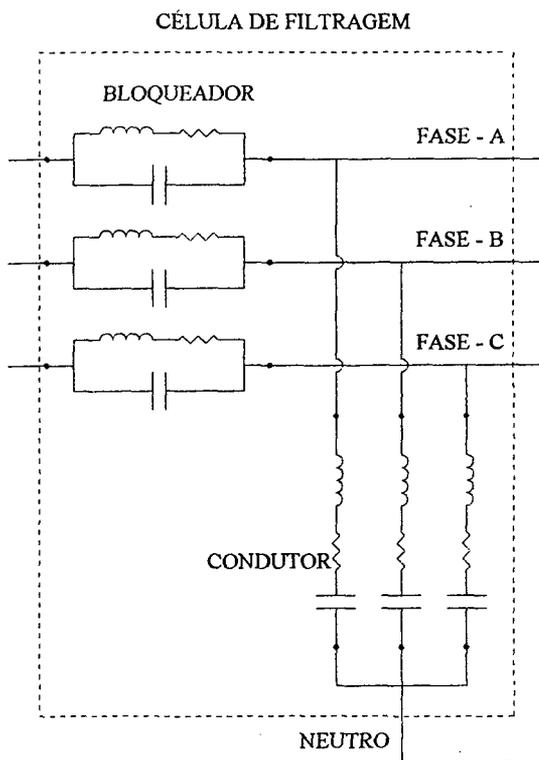


Figura 3.15 – Célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado e filtro de bloqueio paralelo de fase (Célula III).

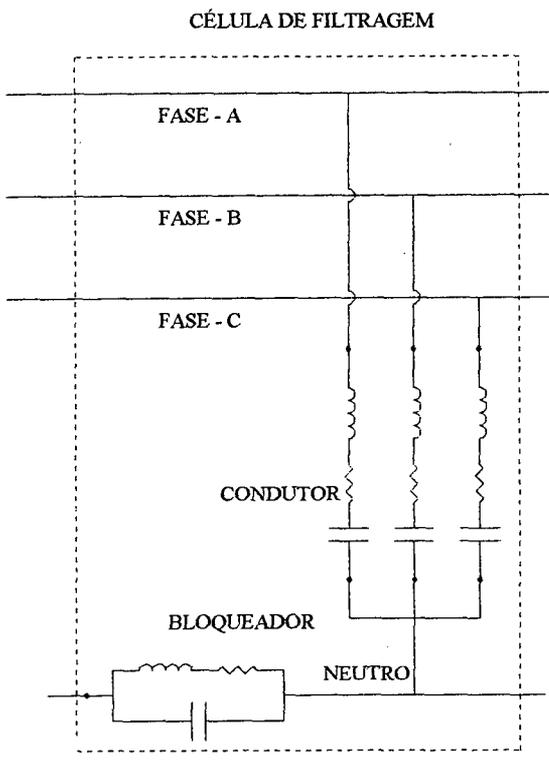


Figura 3.16 – Célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado e filtro de bloqueio paralelo de neutro (Célula IV).

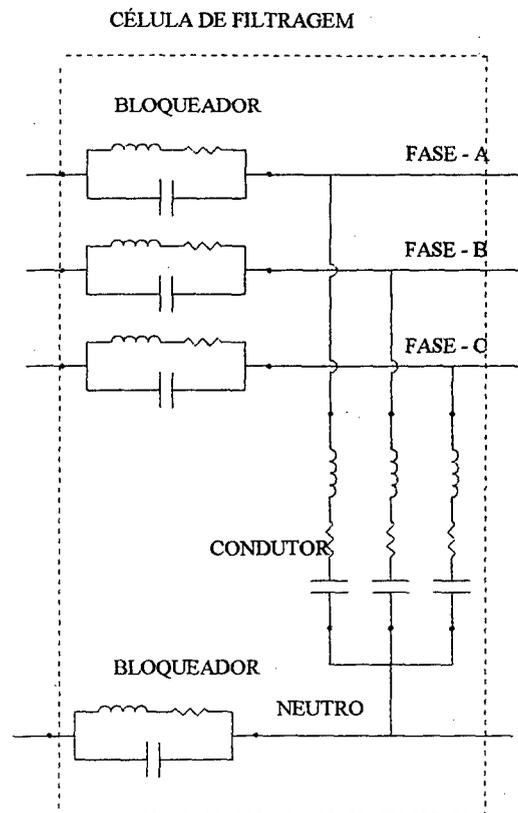


Figura 3.17 – Célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado e filtro de bloqueio paralelo de neutro e de fase (Célula V).

Todas as células de filtragem ilustradas compõe diferentes possibilidades de executar tanto o processo de bloqueio como o de filtragem de harmônicas. Com exceção da Célula I, sempre haverá pelo menos um elemento bloqueador e um elemento condutor. Muitas outras possibilidades podem ainda ser exploradas, sendo porém ilustradas e apresentadas somente as estruturas definidas no desenvolvimento deste trabalho.

3.5 – Conclusão

Os filtros de bloqueio apresentam-se como uma nova estrutura capaz de aprimorar o processo de filtragem de harmônicos. Os filtros de bloqueio paralelo e série, de neutro e de fase, podem para cada situação específica, acarretar ganhos extremamente elevados em termos de qualidade de filtragem, com incremento de pequeno peso e volume. Com o auxílio destas estruturas pode-se criar o conceito de célula de filtragem e, a partir disto, definir quais as possibilidades de uso de cada topologia para cada situação encontrada. Os filtros de bloqueio paralelo serão apresentados com maiores detalhes nos próximos capítulos, sendo o filtro de bloqueio série apenas apresentado como um novo e promissor elemento de auxílio à filtragem passiva, cabendo a estes futuros estudos.

Capítulo 4 – Projetos e Simulações de Filtros de Bloqueio Paralelo

4.1 – Introdução

Este capítulo trata de apresentar os principais aspectos relacionados a caracterização de uma instalação elétrica do tipo comercial, enfocando a apresentação de sua carga característica e suas possíveis variações. Desenvolve-se a análise de várias possibilidades de utilização de diversas células de filtragem que utilizam filtros de bloqueio paralelo, ideais para este tipo de instalação, para obter-se a melhor caracterização do sistema de filtragem a ser utilizado. Serão abordados também vários aspectos construtivos e de projeto para as células de filtragem utilizadas.

4.2 – Caracterização de uma Instalação Elétrica Comercial

Com o crescimento da área de prestação de serviços, grandes edificações capazes de abrigar muitos estabelecimentos comerciais começaram a ser construídos. Nestas instalações observou-se, com o passar do tempo, uma grande predominância de cargas não-lineares monofásicas. Estas cargas possuem características que degradam a qualidade da energia do sistema, inserindo fatores extremamente ruins neste tipo de instalação sob a ótica de desenvolvimento de projetos de filtragem passiva de harmônicos, das quais pode-se citar:

- ✓ Elevado fator de deslocamento, fruto da presença de baixos valores de deslocamento entre as fundamentais da tensão e da corrente, ocasionado pelos reatores eletrônicos e magnéticos e da baixa presença de motores em geral, sendo a presença de elevado conteúdo de carga indutiva advinda de condicionadores de ar, um fator sazonal e portanto não contemplado na visão de carga fixa da instalação.
- ✓ Elevado conteúdo harmônico advindo de microcomputadores, reatores eletrônicos de baixa qualidade e cargas em geral alimentadas em tensão contínua, as quais apresentam na entrada, característica de retificador monofásico com filtro capacitivo.
- ✓ Baixa potência total da instalação.

Estes três aspectos apresentados convergem para as seguintes dificuldades para projeto de filtros passivos:

- ✓ Com elevado fator de deslocamento haverá baixo valor total de capacitância passível de ser alocada nos filtros shunt sintonizados, fazendo com que haja a caracterização de filtros de banda de passagem muito estreita, ou ainda a necessidade de filtros muito bem sintonizados para que haja qualidade de filtragem.
- ✓ Com baixos valores de capacitância envolvidos em cada filtro, aumenta-se a possibilidade de perda de sintonia e de amplificação harmônica, advindo de possíveis deslocamentos que coloquem a frequência de amplificação harmônica sintonizada com uma das harmônicas características do sistema.
- ✓ Com baixos valores de capacitância, serão necessários elevados valores de indutância, ocasionando elevados valores de peso/volume dos reatores.
- ✓ Com elevada TDH, porém associada a baixas potências, a área dos condutores que formam o enrolamento do indutor não necessitará ser elevada e, com isto, a resistência total dos filtros shunt sintonizados tende a ser muito mais elevada do que a própria impedância do transformador (alimentador), dificultando a qualidade de filtragem dos harmônicos através dos filtros shunt sintonizados.

Nestes quatro casos citados, observa-se que todas as melhores características que possibilitariam um aumento na qualidade de filtragem harmônica perdem-se quase que por completo. Nestes casos em que há grande dificuldade de utilização de filtros shunt sintonizados para atenuação de componentes harmônicos, a utilização de filtros ativos poderia inicialmente parecer mais atrativa. Realmente concorda-se que, com somente o uso de filtros shunt, a garantia de filtragem, qualidade e confiabilidade não podem ser plenamente garantidas. Porém com o uso de diversos elementos de filtragem pode-se obter resultados extremamente satisfatórios, com qualidade maior do que a encontrada em casos mais propícios à filtragem passiva (baixo fator de deslocamento e elevada potência de carga instalada) utilizando-somente filtros shunt sintonizados.

Para um completo estudo das possibilidades de utilização de células de filtragem em instalações comerciais, deve-se buscar caracterizar a carga típica da instalação e observar várias possibilidades de variação de parâmetros na carga típica encontrada. Em segundo lugar, adotar todos os padrões possíveis de filtragem, neste caso as cinco células

básicas de filtragem, que podem ser utilizadas para o pior caso de ocorrência harmônica possível neste tipo de instalação.

4.3 – Carga Típica de uma Instalação Elétrica Comercial

O tipo preponderante de cargas em uma instalação elétrica comercial é monofásica, devido a baixa potência dos equipamentos instalados. Os equipamentos mais comumente encontrados neste tipo de instalação são os microcomputadores, lâmpadas fluorescentes com reatores magnéticos ou eletrônicos, condicionadores de ar e equipamentos eletrônicos em geral.

Grande parte dos equipamentos eletrônicos atualmente utilizam conversão de energia, ou seja, necessitam transformar a tensão CA da rede de alimentação em uma tensão CC de nível variável, dependendo de sua aplicação. O estágio de entrada mais utilizado para efetuar-se a conversão CA-CC é o retificador monofásico com filtro capacitivo (RMFC), por apresentar custo extremamente baixo, grande robustez e baixo custo de manutenção. Mesmo apresentando todas estas vantagens, o RMFC possui uma grande desvantagem, acarreta grande distorção harmônica na corrente de entrada. Os equipamentos encontrados em instalações comerciais possuem RMFC em seu estágio de entrada, e este é o fator mais importante na caracterização da carga típica destas instalações.

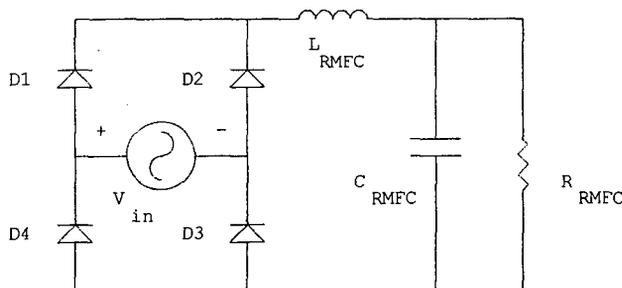


Figura 4.1 – Retificador monofásico com filtro capacitivo.

Como exemplo, apresenta-se na figura 4.2 os dados de simulação para um RMFC com os seguintes parâmetros:

$C_{RMFC} = 470\mu F$
$R_{RMFC} = 200\Omega$
$L_{RMFC} = 100\mu H$
$V_{in} = 311 \cdot \text{sen}(377 \cdot t) [V]$

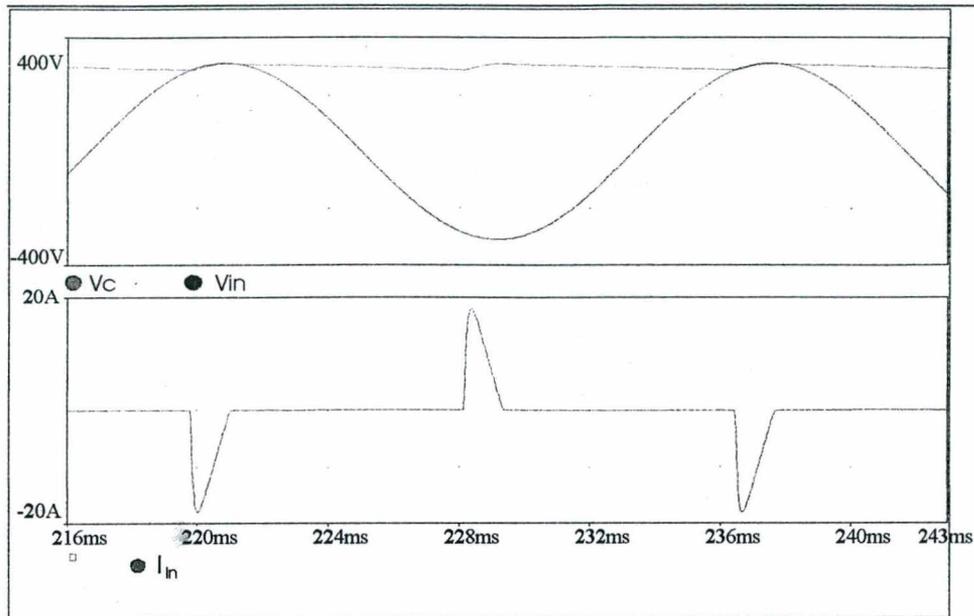


Figura 4.2 – Tensão no capacitor, tensão de alimentação e corrente de entrada

Tabela 4.1 – Espectro harmônico da corrente de entrada do RMFC.

Harmônica	Corrente (A)	Corrente (%)
1	2,93	100
3	2,84	95,91
5	2,61	88,41
7	2,29	77,44
9	1,92	64,88
11	1,53	51,71
13	1,16	39,29
15	0,86	29,03
17	0,65	22,23
TDH	-	180,91

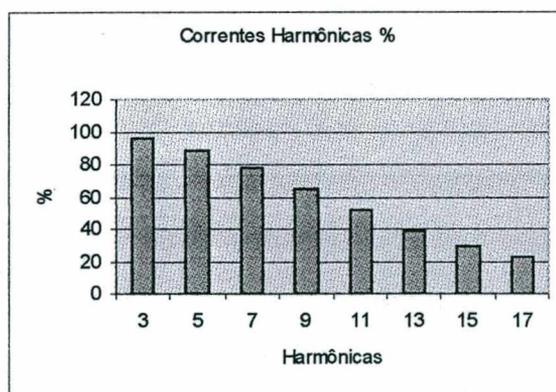


Figura 4.3 – Harmônicos da corrente de entrada.

A distorção harmônica total da corrente de entrada alcança níveis muito elevados (180 % neste caso), com as amplitudes das harmônicas de corrente de ordem 3 e 5 próximas do valor da corrente fundamental. Desta forma, constata-se que os equipamentos que possuem a estrutura RMFC trazem grandes desvantagens em termos de inserção de

harmônicos na rede de alimentação. Como esta é a estrutura mais encontrada em equipamentos utilizados em instalações comerciais, deve ser utilizada como base para o estudo e modelagem da carga típica para este tipo de instalação.

4.4 – Variação de Parâmetros de um RMFC

Um dos passos primordiais para o completo êxito de um projeto de filtros passivos para correção de distorção harmônica em sistemas elétricos de baixa tensão, é o de buscar-se o melhor modelo de simulação possível diante dos dados de medição obtidos. Para que este importante passo possa ser alcançado com perfeição deve-se conhecer qual o tipo de carga predominante da instalação e, à partir deste ponto, conhecer quais parâmetros são passíveis de alteração e como estes refletem-se na resposta em frequência da corrente e da tensão analisadas.

Como já citado anteriormente, a carga típica que gera distorção harmônica de corrente e tensão em instalações de caráter tipicamente comercial é o retificador monofásico com filtro capacitivo (RMFC). Esta deve ser portanto a carga típica a ser considerada para alcançar-se um modelo ideal de simulação que possa servir de base de estudos para o desenvolvimento de projetos de filtros passivos.

Há três componentes que inicialmente podem ser variados para alcançar padrões desejados das grandezas do sistema:

- 1) A Resistência (R_{RMFC}): Relaciona-se diretamente com o valor absoluto da amplitude dos harmônicos, uma vez que está diretamente ligada a determinação da potência da carga representativa.
- 2) A Capacitância (C_{RMFC}): Relaciona-se com a amplitude das harmônicas de maior frequência, uma vez que o capacitor determinará o tempo de condução dos diodos da ponte retificadora (t_c). Deste modo, quanto maior foro valor de C_{RMFC} menor será o tempo de condução e maior será a derivada de corrente e consequentemente maior será a amplitude das correntes de elevada frequência.
- 3) A Indutância (L_{RMFC}): Esta é a indutância existente no sistema incluída todas as indutâncias físicas (reatores na entrada das fontes, estabilizadores de tensão) e as indutâncias parasitas (cablagem). Como princípio básico, sua presença reduz

as derivadas de corrente, reduzindo as amplitudes das harmônicas em praticamente todo o espectro de frequência.

Estes parâmetros devem ser ajustados para a obtenção dos valores encontrados em medições em relação aos valores simulados. Para tal, necessita-se observar como a variação de cada um destes influencia as correntes harmônicas de entrada.

4.4.1 – Variação do Valor de C_{RMFC}

Inicia-se o processo de verificação de variação de parâmetros na resposta da corrente de entrada do RMFC, variando-se o valor de C_{RMFC} em condição de carga constante. Considera-se como exemplo uma carga $R_{RMFC} = 90 \Omega$ ($P \approx 1000W$), variando-se então o valor da capacitância de $800\mu F$ até $1400\mu F$, em passos de $200\mu F$. O valor da indutância L_{RMFC} será mantida constante em $50\mu H$, para que seu efeito seja imperceptível na análise da variação da capacitância. Os dados e resultados de simulação podem ser à seguir observados.

Tabela 4.2 – Dados para observação da variação do valor de C_{RMFC} .

C_{RMFC} (μF)	R_{RMFC} (Ω)	POTÊNCIA (W)	L_{RMFC} (μH)
800	90	1000	50
1000	90	1000	50
1200	90	1000	50
1400	90	1000	50

Com o uso do programa PSPICE 6.0 simula-se todos os valores adotados para cada caso, observando o espectro harmônico obtido da corrente de entrada. Obtém-se então os resultados abaixo apresentados:

Tabela 4.3 – Valores obtidos por simulação para corrente de entrada e tensão no capacitor.

Harmônicas	Módulo das Correntes Harmônicas (A)				
	$C = 600\mu F$	$C = 800\mu F$	$C = 1000\mu F$	$C = 1200\mu F$	$C = 1400\mu F$
1	6,47	6,67	6,74	6,77	6,78
3	6,35	6,53	6,58	6,6	6,6
5	6,11	6,25	6,27	6,28	6,25
7	5,77	5,84	5,83	5,79	5,75
9	5,34	5,34	5,27	5,2	5,14
11	4,84	4,76	4,64	4,53	4,44
13	4,28	4,12	3,95	3,81	3,7
15	3,76	3,46	3,25	3,08	2,95
17	3,1	2,8	2,56	2,38	2,24
TDH (%)	221,14	213,9	209,7	205,5	202,9
ΔV	45,68	31,8	25,68	21,3	18,2

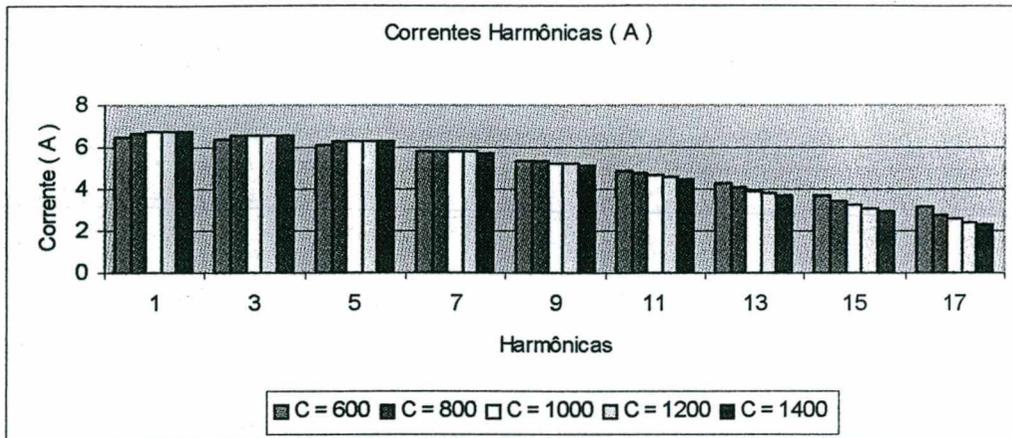


Figura 4.4 – Espectro harmônico da corrente de entrada de uma estrutura do tipo RMFC.

Conclui-se que o aumento/diminuição do valor da capacitância não reflete significativamente no aumento da distorção harmônica da corrente de entrada, ocasionando apenas a redução da ondulação de tensão do capacitor e leve alteração nas componentes de elevada frequência da corrente de entrada. Desta forma a variação de valores do capacitor C_{RMFC} não possui grande influência na busca de modelagem da carga pela variação de parâmetros do RMFC.

4.4.2 – Variação do Valor de L_{RMFC}

A indutância L_{RMFC} é outro parâmetro importante na busca da modelagem de carga em um sistema RMFC.

Inicia-se esta etapa de análise estabelecendo valores fixos para C_{RMFC} e R_{RMFC} , de tal forma que a potência seja mantida em torno de 1.000 W. Desta forma tem-se:

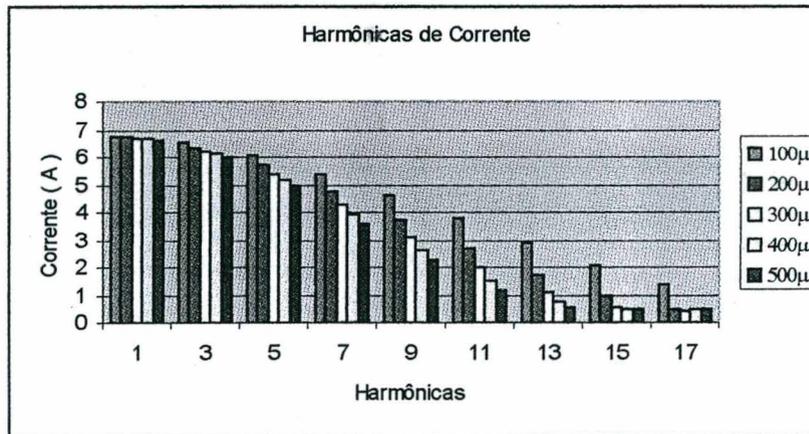
$$\begin{aligned} C_{RMFC} &= 1.000\mu F \\ R_{RMFC} &= 90\Omega \end{aligned}$$

O valor da indutância L_{RMFC} variará entre $100\mu H$ e $500\mu H$, em passos de $100\mu H$. Deseja-se, portanto, observar como a indutância de dispersão/parasita influencia na resposta em frequência da corrente de entrada de um RMFC.

Os dados simulados podem ser abaixo observados.

Tabela 4.4 – Valores obtidos por simulação para corrente de entrada e tensão no capacitor.

Harmônica	Indutância				
	100 μ F	200 μ F	300 μ F	400 μ F	500 μ F
1	6,76	6,74	6,7	6,66	6,64
3	6,52	6,37	6,24	6,13	6,03
5	6,05	5,69	5,4	5,16	4,95
7	5,4	4,76	4,29	3,93	3,62
9	4,62	3,72	3,1	2,65	2,29
11	3,76	2,66	1,99	1,53	1,2
13	2,9	1,71	1,09	0,75	0,57
15	2,09	0,96	0,55	0,46	0,47
17	1,37	0,51	0,44	0,47	0,47
TDH (%)	186	163	150	142	136
ΔV (V)	25	24,2	23,4	23,1	21,9


 Figura 4.5 – Espectro harmônico da corrente de entrada para variação de L_{RMFC} .

Observa-se que para as harmônicas de elevada frequência ocorre redução da amplitude das correntes quando do aumento da indutância L_{RMFC} , sem que haja influência nas harmônicas de baixa frequência e na ondulação de tensão de C_{RMFC} . Destaca-se portanto que mesmo com baixos valores de indutância pode-se obter uma configuração de amplitude de correntes harmônicas variável para elevadas frequências, sem que haja variação da amplitude das correntes harmônicas de baixa frequência. O valor de L_{RMFC} representa assim uma variável de modelagem importante em termos de confecção de um modelo apropriado para análise e simulação.

4.4.3 – Variação do Valor de R_{RMFC}

O último parâmetro possível de variação para composição de um modelo de simulação para utilização em projetos que envolvam sistemas típicos de estrutura RMFC é

o valor da carga, ou seja, o valor a considerar para R_{RMFC} . O valor da carga deve sempre ser ajustado para que contemple as harmônicas de baixa frequências, pois com o auxílio da variação do parâmetro L_{RMFC} e de C_{RMFC} pode-se ajustar o valor das harmônicas de elevada frequência. A amplitude da corrente fundamental não possui grande importância nesta análise, uma vez que a modelagem de cargas lineares ajustará por fim a amplitude desejada. Ilustra-se portanto como poder-se-ia obter diferentes valores de amplitude para harmônicas de baixas frequências, utilizando a variação de R_{RMFC} . A tabela abaixo ilustra os pontos a serem apresentados:

Tabela 4.5 – Dados obtidos para variação de R_{RMFC} .

Parâmetros				
C_{RMFC}	500 μ F	1.000 μ F	1.500 μ F	2.000 μ F
L_{RMFC}	50 μ H	50 μ H	50 μ H	50 μ H
R_{RMFC}	180 Ω	90 Ω	60 Ω	45 Ω
Potência	500W	1.000W	1.500W	2.000W
Harmônica	Correntes Harmônicas (A)			
1	3,34	6,74	10,12	13,47
3	3,29	6,58	9,81	12,96
5	3,20	6,27	9,20	11,98
7	3,06	5,83	8,33	10,62
9	2,89	5,27	7,28	8,99
11	2,68	4,64	6,11	7,23
13	2,45	3,95	4,89	5,46
15	2,19	3,25	3,72	3,82
17	1,93	2,56	2,62	2,40
TDH (%)	232,70	209,00	193,80	183,00
ΔV (V)	26,00	25,50	25,00	24,70

Observa-se que com o aumento da carga, ou seja, com a redução do valor de R_{RMFC} , tanto a componente fundamental como todas as demais harmônicas, sofrem aumento em valores absolutos. Desta forma, quando observa-se o elevado valor das harmônicas de baixa frequência, deve-se ajustar R_{RMFC} , tal que a harmônica de menor ordem seja satisfeita, deixando as harmônicas de maior ordem para serem ajustadas com os demais parâmetros.

4.4.4 – Considerações para Variação de Parâmetros em um RMFC

Após definidas as características de cada variação de parâmetro possível em uma estrutura RMFC pode-se determinar alguns passos a serem executados na tentativa de

obtenção de uma estrutura de simulação que aproxime-se de dados reais colhidos de medições em um sistema elétrico comercial de baixa tensão.

- ⇒ O primeiro passo deve ser observar qual a ordem da harmônica de menor frequência mais significativa em termos de amplitude. Esta deve ser a meta a ser alcançada variando-se o valor de R_{RMFC} . O valor de C_{RMFC} deve ser ajustado na proporção de $1\mu F$ para cada $1W$ a medida que varia-se o valor de R_{RMFC} , para que não haja perda do fator ΔV do capacitor de saída.
- ⇒ O segundo passo é ajustar o valor de C_{RMFC} de tal modo que este possa influenciar o aumento ou redução das amplitudes das harmônicas de elevada frequência. Para tal deve-se sempre observar a ondulação da tensão de saída, uma vez que a mesma não deve nunca ser superior a 20% da tensão de saída, e nem inferior a 5% da mesma.
- ⇒ O terceiro parâmetro a ser ajustado deve ser o valor de L_{RMFC} , uma vez que este é o fator que mais influencia as amplitudes das harmônicas. O aumento deste acarreta variações a partir da terceira harmônica, fato que traz grande poder de ajuste a este parâmetro.

O processo de aquisição de dados de medição também deve ser muito bem avaliado, alguns pontos importantes sobre este aspecto também necessitam ser esclarecidos:

- ⇒ Quando a amplitude da harmônica em relação a fundamental estiver próxima ou inferior ao valor de erro do medidor (este determinado pela classe de exatidão do mesmo), deve-se desconsiderar este valor, uma vez que qualquer ruído presente no sistema pode alterar significativamente o valor da grandeza, imputando elevado erro ao modelo e à análise. Além deste fato, há grande probabilidade de que o valor percentual desta harmônica seja muito menor do que o exigido por norma, o que faz com que este não seja significativo em termos de resultados de projeto.
- ⇒ Deve-se obter vários valores de medição para vários períodos do dia, para que sejam determinadas todas as possibilidades de configuração harmônica possível do sistema. Com todas as possibilidades levantadas deve-se fazer a escolha do que considera-se a pior situação de carga harmônica, e para este ponto, buscar um modelo de simulação e de projeto.

Ficam assim definidos os principais passos para determinação do modelo a ser utilizado em projetos de filtros passivos para instalações de baixa tensão com característica RMFC.

4.5 - Caracterização e Modelagem de Sistemas Elétricos Comerciais

Para que seja possível observar a atuação de todas as células de filtragem apresentadas no Capítulo 3, é necessário modelar três situações especiais de carga típica de instalações comerciais de baixa tensão:

- I. Sistema Trifásico Composto por Cargas Monofásicas Totalmente Equilibradas: Sistema teórico, o qual representa a melhor situação possível de projeto em termos de filtragem passiva de harmônicos. Todas as correntes, fundamental e harmônicas, das três fases do sistema apresentam o mesmo módulo e diferença de fase (120° para as harmônicas não tríplens e 0° para as harmônicas tríplens).
- II. Sistema Trifásico Composto por Cargas Monofásicas de Elevado Desequilíbrio Harmônico: Sistema teórico, o qual representa a pior situação possível de projeto em termos de filtragem passiva de harmônicos. Todas as harmônicas de corrente das três fases apresentam diferenças elevadas, tanto em módulo como em fase.
- III. Sistema Trifásico Real: Adotado como exemplo real de projeto, constitui-se de uma situação típica de uma instalação elétrica comercial de baixa tensão, encontrando-se entre as duas primeiras situações.

Esta etapa será iniciada com a modelagem das três situações acima apresentadas, seguindo para a parte de projeto e simulação da aplicação das células básicas de filtragem para os três casos.

O modelo básico adotado para todos os três casos citados será uma estrutura trifásica composta por cargas monofásicas lineares do tipo R (resistiva pura), RL (resistor em série com indutor) e carga do tipo RMFC como abaixo apresentada.

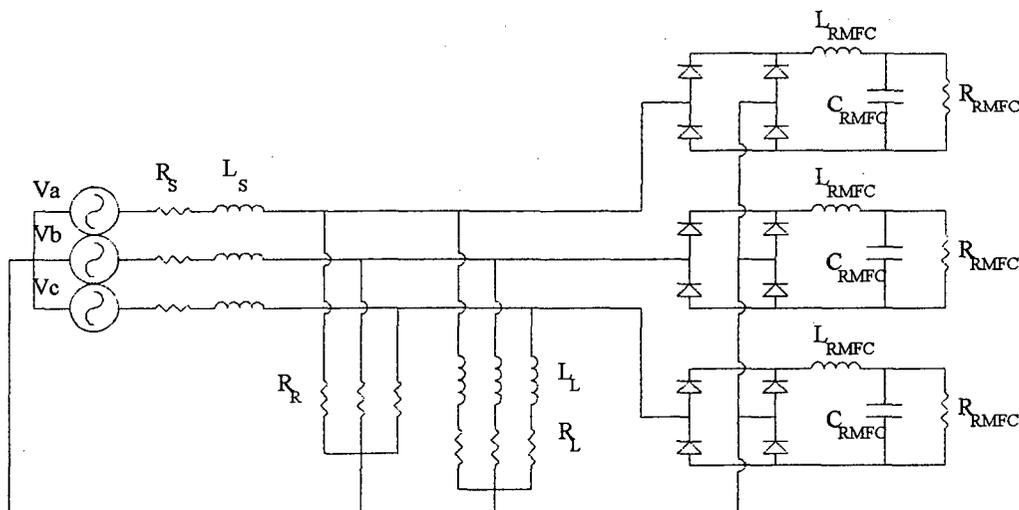


Figura 4.6 – Modelo padrão para uma sistema elétrico comercial de baixa tensão.

4.5.1 - Modelo de um Sistema Trifásico com Cargas Monofásicas Totalmente Equilibradas

A configuração que representaria a melhor situação possível em termos de resultados obtidos para projeto de filtros passivos seria o de uma instalação que apresenta todas as correntes, seja fundamental ou harmônicas, de mesma amplitude e diferença de fase (120° para as harmônicas não triplens e 0° para as harmônicas triplens), nas três fases do sistema. Com isto ter-se-ia um sistema perfeitamente equilibrado, fato este muito difícil de encontrar-se na prática, visto que devido à predominância de cargas monofásicas é muito variável o regime de carga de cada fase da instalação, bem como a seqüência de uso dos equipamentos. Mesmo com esta característica, a possibilidade de encontrar-se baixo desequilíbrio pode ser elevada em muitos sistemas comerciais. Em sistemas trifásicos de características monofásicas de carga existe ainda a possibilidade de efetuar-se remanejamento de cargas entre fases buscando o equilíbrio das correntes.

Mesmo considerando este o caso ideal para projeto de filtros passivos, será desenvolvido um modelo que apresente elevado conteúdo harmônico, para que toda a potencialidade de cada célula de filtragem possa ser melhor avaliada.

O caso base apresenta os seguintes valores:

Dados do Transformador:

$$R_S = 50\text{m}\Omega$$

$$L_S = 50\mu\text{H}$$

Dados das Cargas:

$$R_R = 4\text{ }\Omega$$

$$R_L = 2,5\text{ }\Omega$$

$$L_L = 133\text{mH}$$

$$R_{\text{RMFC}} = 15\text{ }\Omega$$

$$C_{\text{RMFC}} = 6\text{mF}$$

$$L_{\text{RMFC}} = 400\mu\text{H}$$

Como as cargas são consideradas monofásicas completamente equilibradas, os valores apresentados são utilizados na três fases do sistema.

Obtém-se então por simulação os seguintes resultados do modelo apresentado:

Tabela 4.6 – Dados obtidos para o modelo trifásico equilibrado - cargas monofásicas.

Harmônica	Corrente de Fase (A)	Corrente de Neutro (A)	Tensão de Fase (V)
1	111,3	0	305
3	25,24	75,73	1,97
5	12,57	0	1,32
7	3,52	0	0,5
9	2,61	7,82	0,5
11	1,78	0	0,4
13	1,02	0	0,26
15	0,98	2,92	0,28
17	0,6	0	0,19
TDH	25,70%	-	0,83%

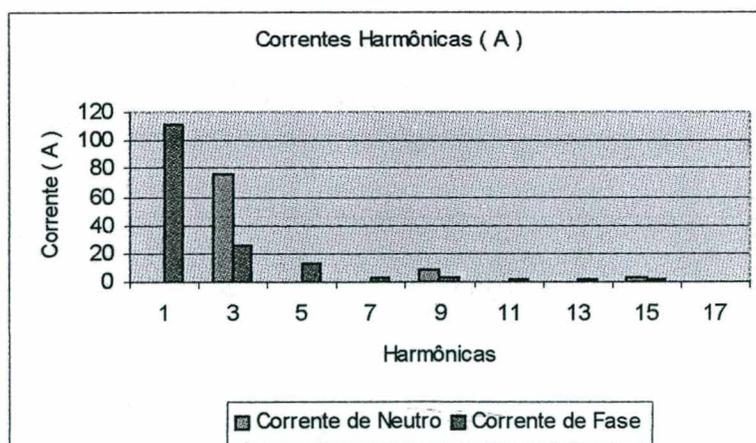


Figura 4.7 – Corrente de fase e de neutro do modelo trifásico equilibrado – cargas monofásicas.

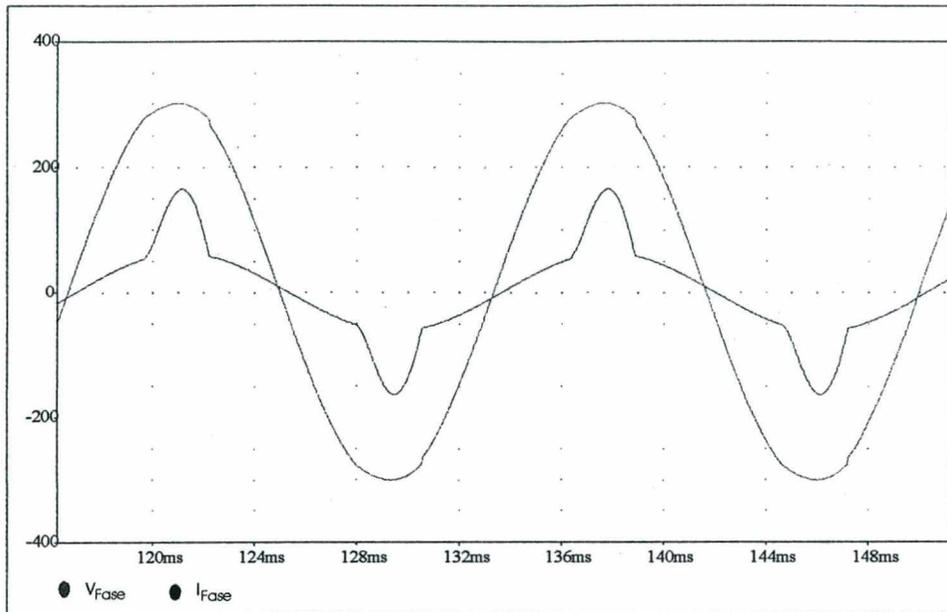


Figura 4.8 – corrente e tensão de fase obtidos por simulação.

Constata-se deste modo elevada distorção harmônica da corrente de fase do sistema, ($TDH = 25,70\%$) e elevada amplitude das correntes harmônicas triplens no neutro do sistema. O caso base portanto encontra-se fora da norma IEEE-519.

4.5.2 – Modelo de um Sistema Trifásico Composto por Cargas Monofásicas de Elevado Desequilíbrio Harmônico

A configuração sistêmica que representaria a pior situação para implementação de filtros passivos para atenuação harmônica seria a de um sistema trifásico composto por cargas monofásicas de elevado desequilíbrio harmônico. Considerando o sistema apresentado como caso base, determina-se os parâmetros do sistema a ser simulado.

Tabela 4.7 – Dados relativos ao modelo trifásico desequilibrado – cargas monofásicas.

PARÂMETROS	FASE A	FASE B	FASE C
R_S	50m Ω	50m Ω	50m Ω
L_S	50 μ H	50 μ H	50 μ H
R_{RMFC}	22,5 Ω	15 Ω	11,25 Ω
C_{RMFC}	4.000 μ F	6.000 μ F	8.000 μ F
L_{RMFC}	400 μ H	400 μ H	400 μ H
R_R	3 Ω	4 Ω	5 Ω
L_L	103mH	83mH	123mH
R_L	2,5 Ω	2,5 Ω	2,5 Ω

Com os dados apresentados inseridos no caso base obtém-se via simulação os seguintes resultados:

Tabela 4.8 – Dados obtidos por simulação para o modelo trifásico desequilibrado – cargas monofásicas.

Harmônica	Corrente Harmônica Fase A	Corrente Harmônica Fase B	Corrente Harmônica Fase C	Corrente Harmônica Neutro	Tensão Harmônica Fase A	Tensão Harmônica Fase B	Tensão Harmônica Fase C
1	127,30	113,10	108,00	19,07	304,50	305,10	305,30
3	19,41	27,05	33,86	80,18	1,48	2,26	2,73
5	12,40	15,22	16,98	4,94	1,76	2,03	2,06
7	5,62	5,26	4,66	4,18	1,51	1,25	0,86
9	1,76	2,35	3,35	6,04	0,91	0,43	0,56
11	1,73	2,33	2,39	1,42	0,32	0,51	0,63
13	1,32	1,17	1,29	2,41	0,33	0,51	0,34
15	0,70	1,04	1,29	2,12	0,45	0,28	0,39
17	0,70	0,85	0,78	0,65	0,33	0,32	0,32
TDH	18,90	28,03	35,60	-	1,02	1,13	1,21

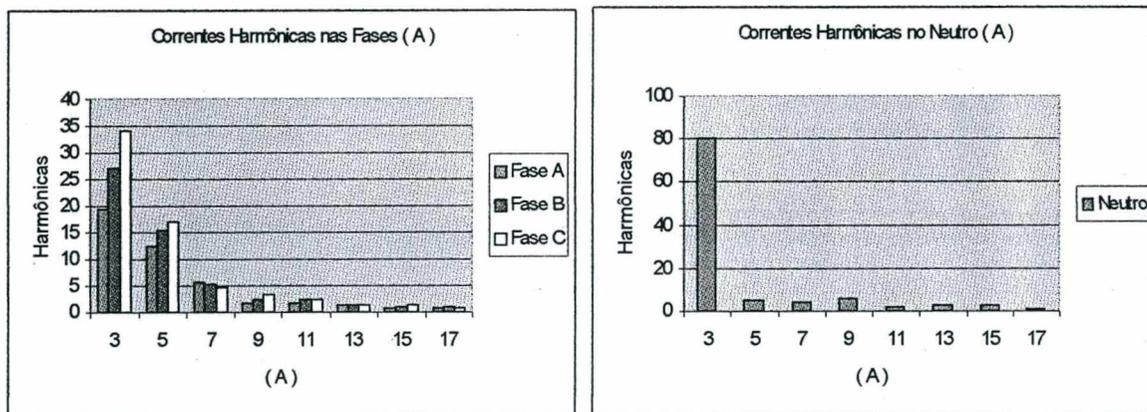


Figura 4.9 – Correntes harmônicas das fases A, B e C e de neutro.

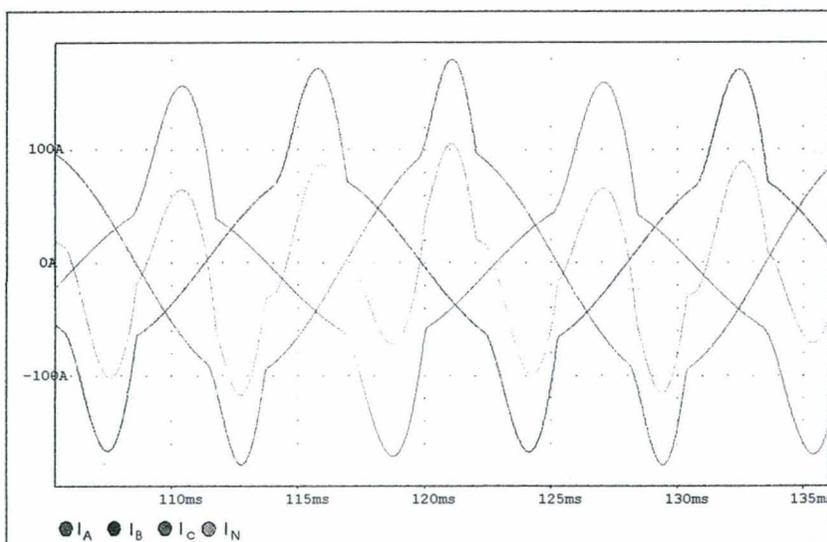


Figura 4.10 – Forma de onda das correntes de fase A, B, C e da corrente de neutro.

Com estes resultados obtém-se o modelo de análise definido para a pior situação de projeto de filtros passivos para atenuação de harmônicas em sistemas elétricos comerciais.

4.5.3 – Modelo de um Sistema Trifásico Real

Para obter-se a caracterização de um sistema elétrico trifásico comercial real, optou-se por fazer medições nas instalações do Instituto de Eletrônica de Potência – INEP. Este caracteriza-se por um modelo intermediário entre o pior e o melhor caso que se pode encontrar, em relação ao projeto de filtros passivos.

As medidas obtidas nesta instalação encontram-se abaixo indicadas:

Tabela 4.9 – Dados obtidos através de medições nas instalações do INEP.

FASE A	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS (V)	220,00	2,85	4,04	1,25	0,59	0,51	0,70	0,36	0,36
Tensão %	100,00	1,29	1,83	0,57	0,27	0,23	0,03	0,16	0,16
Fase (Tensão)	0.0	-62.6	-148	-3.5	98.8	-83.4	156	115	-73.8
Corrente RMS (A)	82,40	6,44	5,88	2,81	0,97	0,20	0,47	0,23	0,11
Corrente %	100,00	7,81	7,14	3,41	1,18	0,24	0,58	0,28	0,14
Fase (Corrente)	0.0	-177	-53.4	140	-51.5	145	102	-31	99.3
FASE B	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS (V)	218,00	2,97	5,34	2,85	0,56	0,36	1,04	0,68	0,40
Tensão %	100,00	1,36	2,45	1,31	0,26	0,17	0,48	0,31	0,18
Fase (Tensão)	0.0	-75.9	-170	-11.7	163	164	-22.2	175	111
Corrente RMS (A)	117,00	17,90	9,82	4,33	0,69	1,42	1,4	0,62	0,55
Corrente %	100,00	15,23	8,36	3,68	0,59	1,21	1,20	0,53	0,47
Fase (Corrente)	0.0	162	-23.7	167	29.9	-56.5	132	-23.3	-104
FASE C	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	659 Hz	779 Hz	899 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS (V)	216,00	3,24	5,52	2,21	0,71	0,29	0,65	0,58	0,51
Tensão %	100,00	1,50	2,56	1,02	0,33	0,14	0,30	0,27	0,02
Fase (Tensão)	0.0	-95.2	-151	-16.4	111	-86.7	-67.2	136	-51.3
Corrente RMS (A)	121,00	11,30	6,86	3,03	1,15	0,51	0,89	0,54	0,25
Corrente %	100,00	9,34	5,65	2,50	0,95	0,42	0,74	0,45	0,21
Fase (Corrente)	0.0	142	-36	133	-49.6	-96.3	116	-80.5	121

Com estes dados apresentados e utilizando o modelo para sistemas elétricos comerciais desenvolveu-se um modelo para simulação com os seguintes parâmetros:

Tabela 4.10 – Dados utilizados para obtenção do modelo de simulação das instalações do INEP.

PARÂMETROS	FASE A	FASE B	FASE C
R_s	50m Ω	50m Ω	50m Ω
L_s	50 μ H	50 μ H	50 μ H
R_{RMFC}	52 Ω	17,5 Ω	26 Ω
C_{RMFC}	2000 μ F	2600 μ F	2000 μ F
L_{RMFC}	400 μ H	450 μ H	600 μ H

PARÂMETROS	FASE A	FASE B	FASE C
R_R	2,8 Ω	2,5 Ω	2,5 Ω
L_L	103mH	103mH	103mH
R_L	2,5 Ω	2,5 Ω	2,5 Ω

Obtendo-se para estes parâmetros os seguintes resultados:

Tabela 4.11 – Dados obtidos via simulação para modelagem das instalações do INEP.

FASE A	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS (V)	215,67	0,53	0,54	0,46	0,28	0,13	0,13	0,14	0,11
Tensão %	100,00	0,24	0,25	0,21	0,13	0,06	0,06	0,07	0,05
Corrente RMS (A)	85,28	6,67	5,07	3,22	1,60	0,62	0,52	0,51	0,33
Corrente %	100,00	7,82	5,94	3,77	1,87	0,72	0,61	0,60	0,39
FASE B	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS	213,76	1,28	1,06	0,55	0,22	0,30	0,21	0,16	0,18
Tensão %	100,00	0,60	0,49	0,26	0,10	0,14	0,10	0,07	0,08
Corrente RMS	119,29	16,76	9,98	3,87	1,28	1,44	0,83	0,56	0,56
Corrente %	100,00	14,05	8,37	3,25	1,07	1,20	0,70	0,47	0,47
FASE C	1 ^a	3 ^a	5 ^a	7 ^a	9 ^a	11 ^a	13 ^a	15 ^a	17 ^a
Frequência	60 Hz	180 Hz	300 Hz	420 Hz	540 Hz	660 Hz	780 Hz	900 Hz	1.02 kHz
Tensão RMS	213,62	0,91	0,76	0,45	0,18	0,22	0,18	0,12	0,13
Tensão %	100,00	0,42	0,36	0,21	0,08	0,10	0,08	0,05	0,06
Corrente RMS	122,05	11,61	7,22	3,10	1,00	1,02	0,70	0,40	0,40
Corrente %	100,00	9,51	5,91	2,54	0,82	0,83	0,57	0,32	0,33

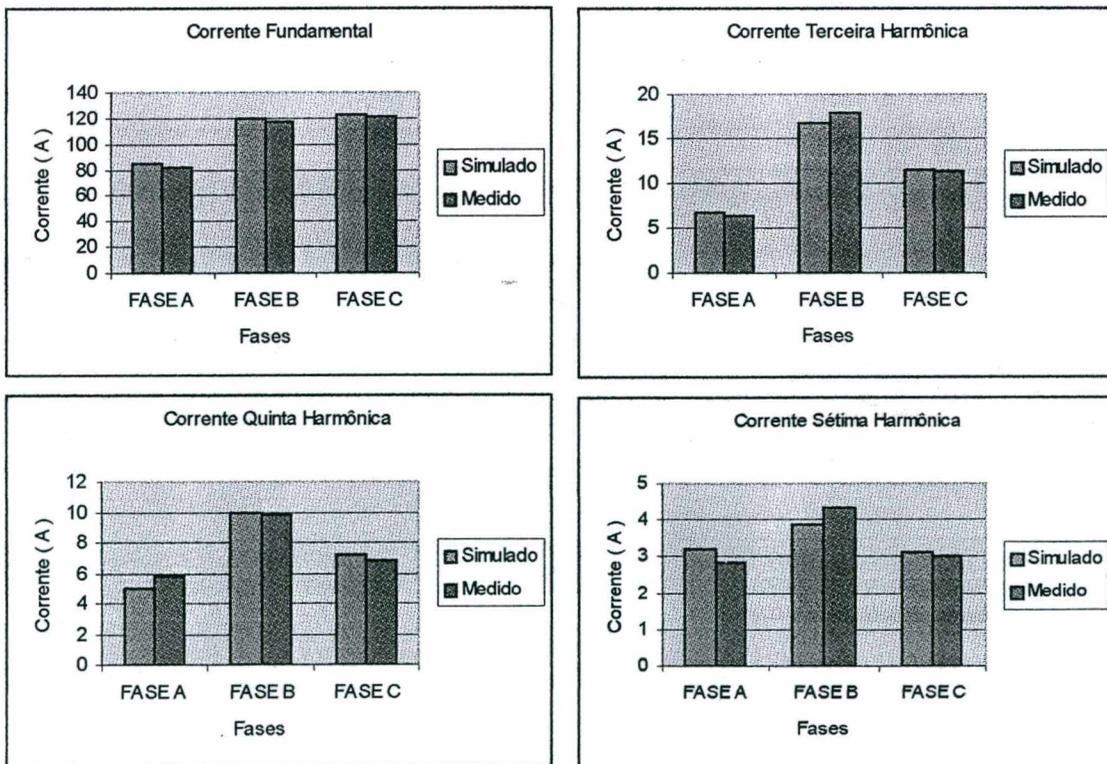


Figura 4.11 – Valores de correntes simuladas e medidas.

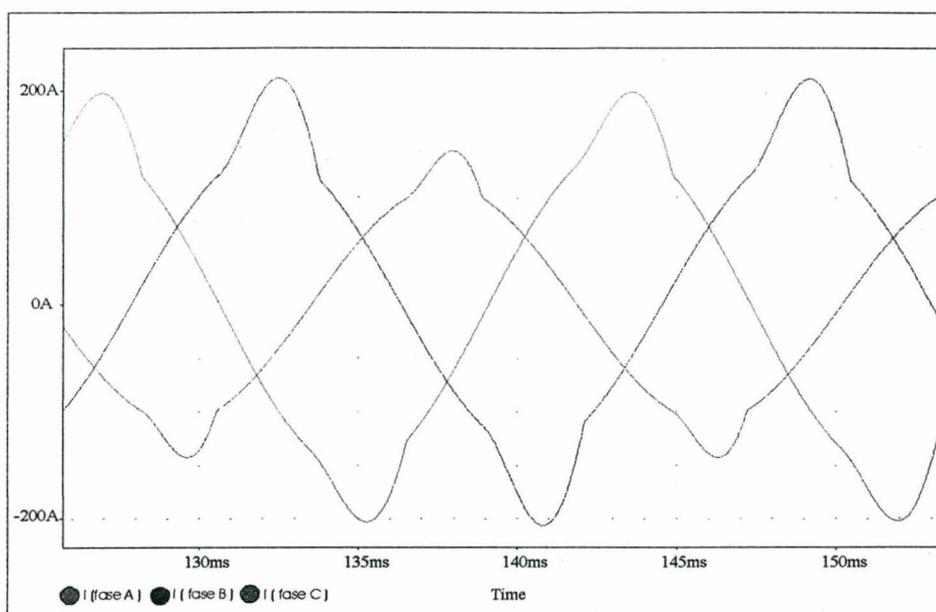


Figura 4.12 – Correntes Obtidas via Simulação nas Fases A,B e C do Alimentador

Observa-se que com a utilização do modelo básico apresentado no item [4.5] pode-se obter boa compatibilidade de valores medidos e simulados, principalmente em relação as harmônicas de menor frequência. Destaca-se que a medida que a frequência das harmônicas aumenta, há um aumento percentual do erro entre os valores medido e simulado. Este erro não caracteriza-se como uma variável importante, pois pode-se observar que a partir da 11^a harmônica, o valor absoluto e percentual encontrado para estas harmônicas é menor do que a classe de precisão do instrumento de medida; desta forma qualquer ruído pode ocasionar erros muito elevados. Destaca-se ainda que as amplitudes destas harmônicas encontram-se extremamente reduzidas, fato que não traz problema algum em termos de projeto e de repostas obtidas após finalizado o estudo.

Os resultados obtidos serão portanto utilizados para os estudos de projeto de filtros sintonizados a serem empregados nesta instalação.

4.6 – Projeto e Simulação de Células de Filtragem para Sistemas Comerciais

4.6.1 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado (Célula I)

A célula de filtragem I caracteriza-se pela forma mais simples e utilizada em instalações elétricas em geral. O desenvolvimento do projeto para os três casos apresentados nos itens [4.5.1], [4.5.2] e [4.5.3] deve ser idêntico, visto que a característica de fator de deslocamento nos três casos difere muito pouco.

Como citado no Capítulo 2, um dos grandes problemas ao projetar-se filtros shunt sintonizados para a atenuação de harmônicas decorre do fato de que neste tipo de instalação há baixo valor de capacitância total a ser utilizado no projeto dos filtros shunt sintonizados. Para que em cada caso também sejam observadas as variações de resultados entre os três casos sugeridos, cabe utilizar o mesmo elemento condutor, com seus parâmetros inalterados. Para tanto, procura-se encontrar a melhor escolha de projeto para os filtros shunt sintonizados. Os parâmetros utilizados encontram-se abaixo apresentados:

$\phi = 5^\circ$ $I_{ef(RMS)} = 100A$ $V_{ef(RMS)} = 220V$
--

Toma-se estes valores como base em vista de que estes são os valores usuais encontrados nas instalações comerciais de baixa potência as quais este estudo está relacionado. O processo de cálculo de filtros shunt sintonizados para maiores potências, apresentará facilidades muito maiores do que as encontradas utilizando estes valores, uma vez que nestes casos o fator de deslocamento associado à elevada corrente traz a possibilidade de uso de maiores valores de capacitância no projeto dos filtros. Todo o desenvolvimento do projeto é calcado na concepção de filtros equilibrados, sejam monofásicos ou trifásicos.

Com os valores definidos e utilizando o equacionamento dos apêndices A e B encontram-se os seguintes valores para os componentes dos filtros desta célula:

Tabela 4.12 - Dados obtidos para projeto de filtros shunt sintonizados.

Dados de Projeto (Filtros)	Filtro de 3ª. Harmônica			Filtro de 5ª. Harmônica		
	C (μF)	L (mH)	R ($\text{m}\Omega$)	C (μF)	L (mH)	R ($\text{m}\Omega$)
Projeto 1	90,00	8,68	150,00	60,00	4,70	125,00
Projeto 2	105,00	7,44	135,00	75,00	3,75	105,00
Projeto 3	120,00	6,51	126,00	90,00	3,13	95,00

Tabela 4.13 - Dados obtidos para projeto do indutor dos filtros shunt sintonizados.

Dados de Projeto (Indutor)	Filtro de 3a. Harmônica			Filtro de 5a. Harmônica		
	Peso do Indutor (kg)	Volume de Ferro (cm^3)	Área de Janela (%)	Peso do Indutor (kg)	Volume de Ferro (cm^3)	Área de Janela (%)
Projeto 1	80,00	8000,00	32,30	54,00	5150,00	41,50
Projeto 2	70,00	7900,00	33,60	46,00	4370,00	41,50
Projeto 3	61,00	6000,00	36,00	39,50	3680,00	44,00

Utilizando estes valores para a célula de filtragem composta por filtro shunt sintonizado, encontram-se os seguintes resultados de simulação para os três casos:

➤ **Sistema Equilibrado:**

Tabela 4.14 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema equilibrado.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente de Fase (A)	Tensão de Fase (V)	Corrente Neutro (A)	Corrente de Fase (A)	Tensão de Fase (V)	Corrente Neutro (A)	Corrente de Fase (A)	Tensão de Fase (V)	Corrente Neutro (A)
1	110,6	305,5	0	110,8	305,6	0	111,2	305,7	0
3	18,88	1,46	78,31	18,23	1,47	55,65	17,87	1,39	54,47
5	7,85	0,84	0	7,62	0,81	0	6,84	0,74	0
7	3,54	0,5	0	3,53	0,5	0	3,54	0,5	0
9	2,5	0,44	7,54	2,48	0,44	24,03	2,47	0,43	7,41
11	1,79	0,38	0	1,78	0,38	0	1,78	0,37	0
13	0,98	0,25	0	0,98	0,24	0	0,97	0,23	0
15	0,97	0,28	2,92	0,96	0,28	2,91	0,97	0,27	2,9
17	0,52	0,19	0	0,56	0,19	0	0,59	0,19	0
TDH (%)	19,03	0,62	x	18,99	0,62	x	17,77	0,59	x

Tabela 4.15 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema equilibrado.

Harmônica	Projeto 1		Projeto 2		Projeto 3	
	Corrente de Fase (%)	Tensão de Fase (%)	Corrente de Fase (%)	Tensão de Fase (%)	Corrente de Fase (%)	Tensão de Fase (%)
3	17,07	0,48	16,45	0,48	16,07	0,45
5	7,10	0,27	6,88	0,27	6,15	0,24
7	3,20	0,16	3,19	0,16	3,18	0,16
9	2,26	0,14	2,24	0,14	2,22	0,14
11	1,62	0,12	1,61	0,12	1,60	0,12
13	0,89	0,08	0,88	0,08	0,87	0,08
15	0,88	0,09	0,87	0,09	0,87	0,09
17	0,47	0,06	0,51	0,06	0,53	0,06
TDH (%)	19,03	0,62	18,99	0,62	17,77	0,59

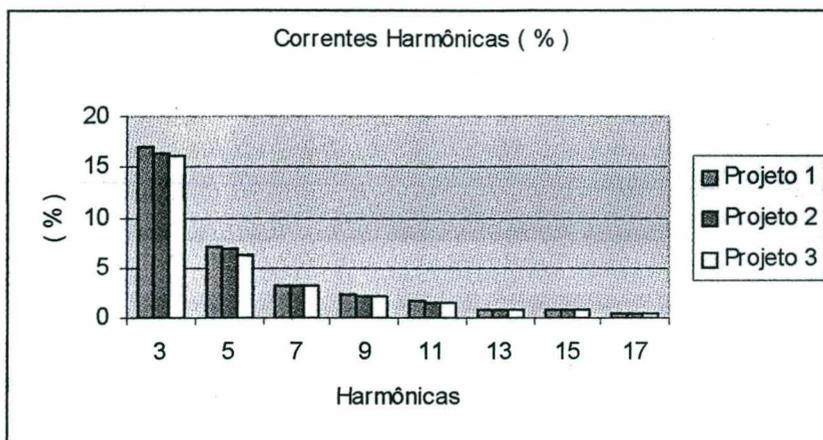


Figura 4.13 – Resultados de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema equilibrado.

➤ **Sistema Desequilibrado Real (INEP):**

Tabela 4.16 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema desequilibrado (INEP).

Harmônica	Projeto 1				Projeto 2				Projeto 3			
	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)
1	133,7	152,6	143,2	17,34	134	152,8	143,5	17,36	134,5	153,2	143,9	17,03
3	7,51	18,1	13,2	38,51	7,32	17,44	12,7	37,1	7,18	16,87	12,25	36,03
5	4,36	8,67	6,38	2,99	4,19	8,38	6,16	2,9	3,75	7,69	5,59	2,7
7	4,47	5,57	4,43	3,13	4,45	5,55	4,43	3,11	4,43	5,55	4,41	3,11
9	2,24	1,71	1,39	3,99	2,24	1,7	1,38	3,98	2,23	1,69	1,39	3,99
11	0,66	2	1,43	2,11	0,84	1,98	1,42	2,09	0,86	1,98	1,41	2,08
13	0,71	1,2	1,01	1,33	0,72	1,2	1	1,33	0,71	1,2	1	1,33
15	0,71	0,75	0,56	1,03	0,71	0,75	0,55	1,02	0,7	0,75	0,56	1,03
17	0,47	0,79	0,58	1,14	0,47	0,78	0,57	1,14	0,47	0,78	0,57	1,14

Tabela 4.17 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema desequilibrado (INEP).

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	5,62	11,86	9,22	5,46	11,41	8,85	5,34	11,01	8,51
5	3,26	5,68	4,46	3,13	5,48	4,29	2,79	5,02	3,88
7	3,34	3,65	3,09	3,32	3,63	3,09	3,29	3,62	3,06
9	1,68	1,12	0,97	1,67	1,11	0,96	1,66	1,10	0,97
11	0,49	1,31	1,00	0,63	1,30	0,99	0,64	1,29	0,98
13	0,53	0,79	0,71	0,54	0,79	0,70	0,53	0,78	0,69
15	0,53	0,49	0,39	0,53	0,49	0,38	0,52	0,49	0,39
17	0,35	0,52	0,41	0,35	0,51	0,40	0,35	0,51	0,40
TDH (%)	7,56	13,8	10,81	7,38	13,32	10,44	7,14	12,79	9,98

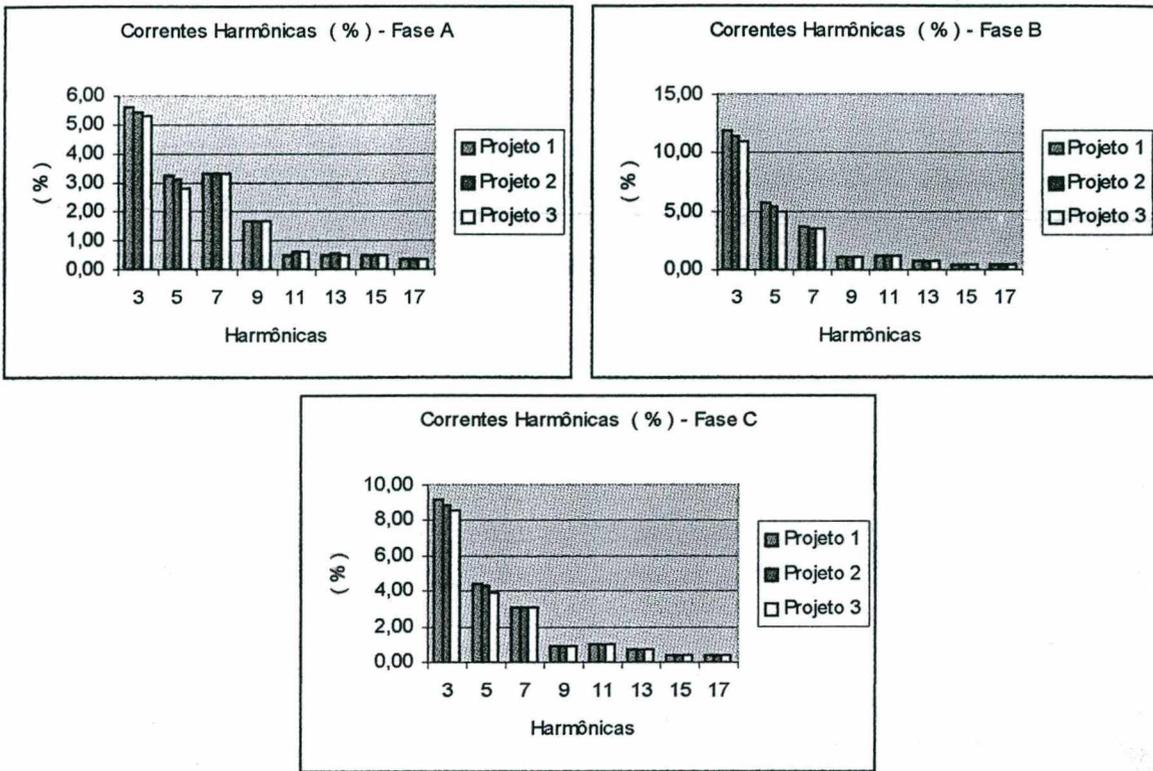


Figura 4.14 – Correntes harmônicas obtidas por simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – Fases A, B e C.

➤ Sistema Desequilibrado:

Tabela 4.18 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema desequilibrado.

Harmônica	Projeto 1				Projeto 2				Projeto 3			
	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)
1	126,30	112,10	106,90	18,53	126,60	112,20	107,10	18,92	127,10	112,50	107,40	18,93
3	14,91	20,37	26,40	61,41	14,50	19,80	25,70	59,73	14,11	19,16	24,89	57,90
5	7,55	9,36	10,96	3,05	7,33	9,02	10,35	2,97	6,60	8,32	9,41	2,73
7	5,65	5,35	4,77	30,93	5,63	5,35	4,76	3,88	5,63	5,35	4,77	3,86
Harmônica	Projeto 1				Projeto 2				Projeto 3			
	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase B (A)	Corrente Fase C (A)	Corrente de Neutro (A)
9	1,75	2,20	3,16	5,64	1,74	2,17	3,12	5,57	1,75	2,17	3,11	5,56
11	1,63	2,30	2,41	1,41	1,65	2,29	2,41	1,41	1,65	2,29	2,41	3,41
13	1,32	1,18	1,23	2,32	1,32	1,18	1,22	2,30	1,31	1,18	1,22	2,29
15	0,69	0,99	1,28	2,03	0,69	0,99	1,27	2,01	0,68	0,98	1,27	2,01
17	0,68	0,86	0,78	0,61	0,68	0,86	0,78	0,60	0,67	0,85	0,78	0,60

Tabela 4.19 - Dados obtidos de simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – sistema desequilibrado.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	11,81	18,17	24,70	11,45	17,65	24,00	11,10	17,03	23,18
5	5,98	8,35	10,25	5,79	8,04	9,66	5,19	7,40	8,76
7	4,47	4,77	4,46	4,45	4,77	4,44	4,43	4,76	4,44
9	1,39	1,96	2,96	1,37	1,93	2,91	1,38	1,93	2,90

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
11	1,29	2,05	2,25	1,30	2,04	2,25	1,30	2,04	2,24
13	1,05	1,05	1,15	1,04	1,05	1,14	1,03	1,05	1,14
15	0,55	0,88	1,20	0,55	0,88	1,19	0,54	0,87	1,18
17	0,54	0,77	0,73	0,54	0,77	0,73	0,53	0,76	0,73
TDH (%)	14,15	20,82	27,33	13,77	20,2	26,56	13,24	19,43	25,5

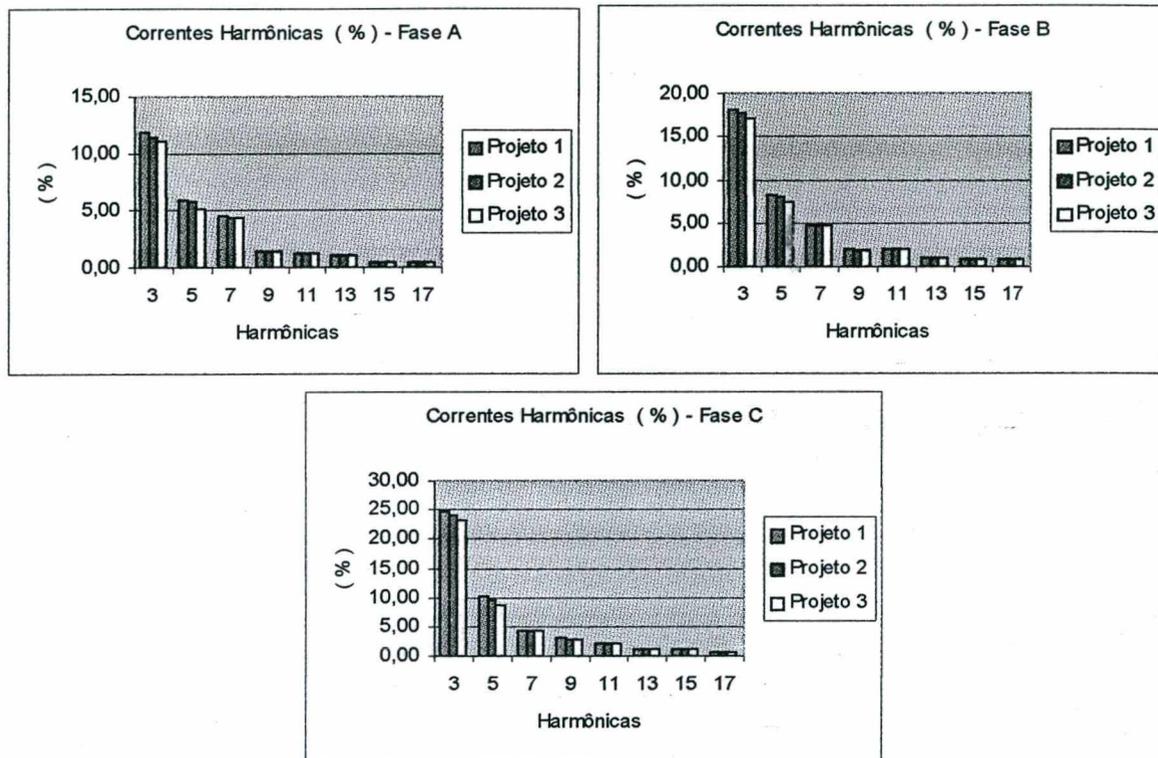


Figura 4.15 – Correntes harmônicas obtidas por simulação para os projetos de célula de filtragem composta por filtros shunt sintonizados – fases A, B e C.

Conclui-se que nestes três casos não foi possível reduzir a distorção harmônica do sistema a níveis recomendados pela norma IEEE-519.

Observa-se que em termos de filtragem das harmônicas de 3^a e 5^a ordem, não há grande diferença entre os três projetos desenvolvidos. Este fato deve-se a caracterização de elevado valor de resistência do filtro encontrada em projeto. Poder-se-ia reduzir este valor de duas maneiras: elevando-se o valor da capacitância dos filtros, com conseqüente redução do valor do indutor e assim acarretando redução direta do valor da resistência, ou aumentando a área de janela do indutor (aumentando assim seu volume), mantendo o mesmo valor de capacitância e, assim, através do aumento da área dos condutores, reduzir a resistência do indutor. A primeira possibilidade apresentada não é possível de ser realizada, pois o valor de capacitância já está limitado pelo fator de deslocamento máximo

(idealmente $FD = 1$). A segunda possibilidade apresenta maior praticidade, porém traz como conseqüência o aumento do peso/volume dos indutores, e conseqüente aumento do custo de implementação destes filtros.

Por apresentar boas relações entre filtragem e peso/volume verificados, o projeto 2 será adotado como padrão para a caracterização do elemento condutor das células básicas de filtragem.

4.6.2 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado e Filtro de Bloqueio Paralelo de Neutro (célula IV)

A segunda célula de filtragem a ser analisada compõe-se de filtro shunt sintonizado e filtro de bloqueio de neutro. Utilizando como elemento condutor os dados obtidos no projeto 2 para filtro shunt sintonizado (item 4.6.1) e considerando a presença de um elemento bloqueador, caracterizado por um filtro de bloqueio paralelo de neutro de terceira harmônica, desenvolve-se três projetos para determinar os parâmetros do elemento bloqueador. Os dados de projeto para estes filtros encontram-se abaixo descritos.

Tabela 4.20 – Dados de projeto obtidos para o elemento condutor da célula de filtragem e para o elemento bloqueador – filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica.

	Filtro de Bloqueio de Neutro			Filtro Shunt Sintonizado	
	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3	3ª. Harmônica	5ª. Harmônica
Indutância (μH)	100	200	300	7.440	3.750
Capacitância (μF)	7.820	3.910	2.600	105	75
Resistência ($\text{m}\Omega$)	50	50	50	135	105

Utilizam-se inicialmente três projetos para definir o elemento bloqueador, devido a necessidade de obter-se a capacidade de bloqueio ideal para projeto, de modo a minimizar as quedas de tensão no sistema e de proporcionar a menor circulação possível de correntes de terceira harmônica no neutro do sistema.

Com os valores apresentados obtém-se os dados de simulação abaixo apresentados.

➤ Sistema Equilibrado:

Tabela 4.21 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase A (A)	Corrente Fase A (A)
3	3,25	1,35	1,01
5	7,11	7,06	7,03
7	4,10	4,05	4,04
9	1,79	1,88	1,99
11	1,80	1,79	1,80
13	0,89	0,87	3,23
15	0,78	0,80	0,81
17	0,66	0,66	0,66
TDH (%)	10,47	9,88	9,84

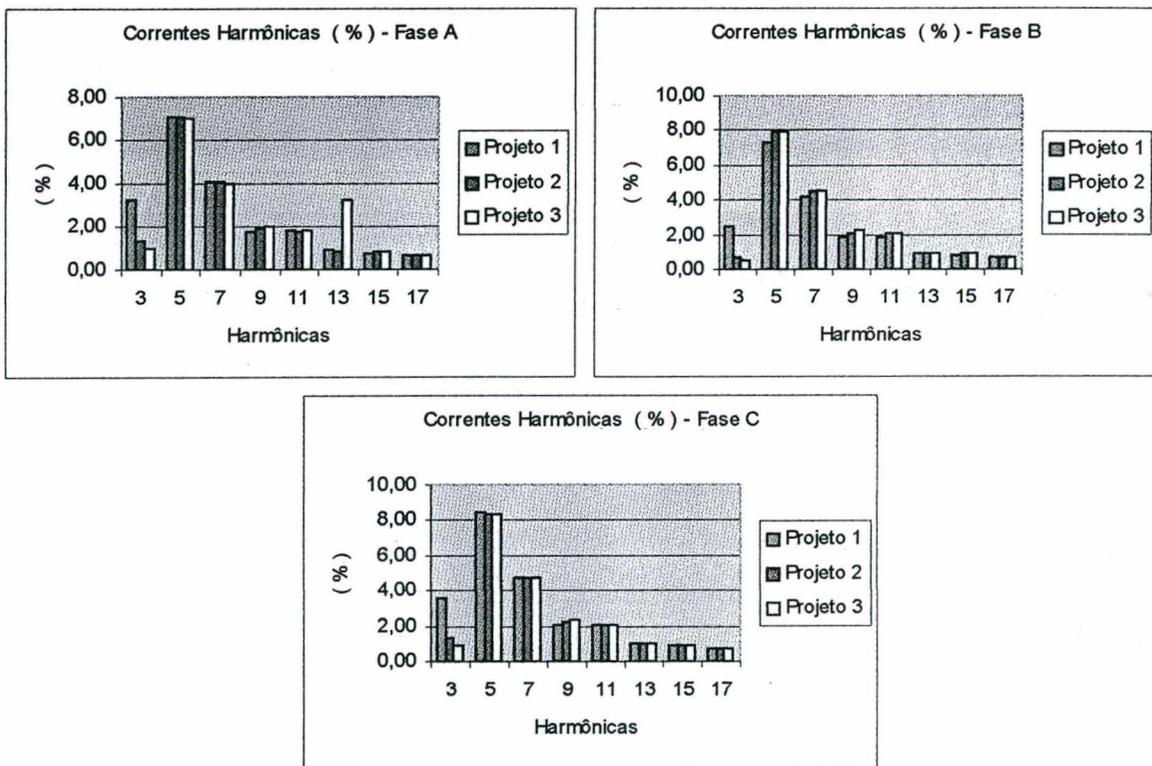


Figura 4.16 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica.

➤ Sistema Desequilibrado Real (INEP):

Tabela 4.22 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	3,56	5,66	1,95	4,06	5,09	0,88	4,28	4,94	0,75
5	4,14	6,72	5,00	4,24	6,99	5,24	4,26	7,00	5,26
7	3,49	4,64	4,04	3,44	5,16	4,05	3,35	5,35	4,11
9	1,82	1,36	1,27	1,88	1,45	1,30	1,94	1,43	1,33
11	0,66	1,64	1,29	0,66	1,79	2,21	0,64	1,80	1,27

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
13	0,56	0,97	0,91	0,55	1,06	0,90	0,53	1,08	0,91
15	0,56	0,60	0,51	0,56	0,64	0,51	0,56	0,64	0,52
17	0,36	0,64	0,52	0,36	0,70	0,52	0,36	0,71	0,51
TDH (%)	10,47	10,09	10,41	9,88	9,70	9,88	9,84	9,70	9,86

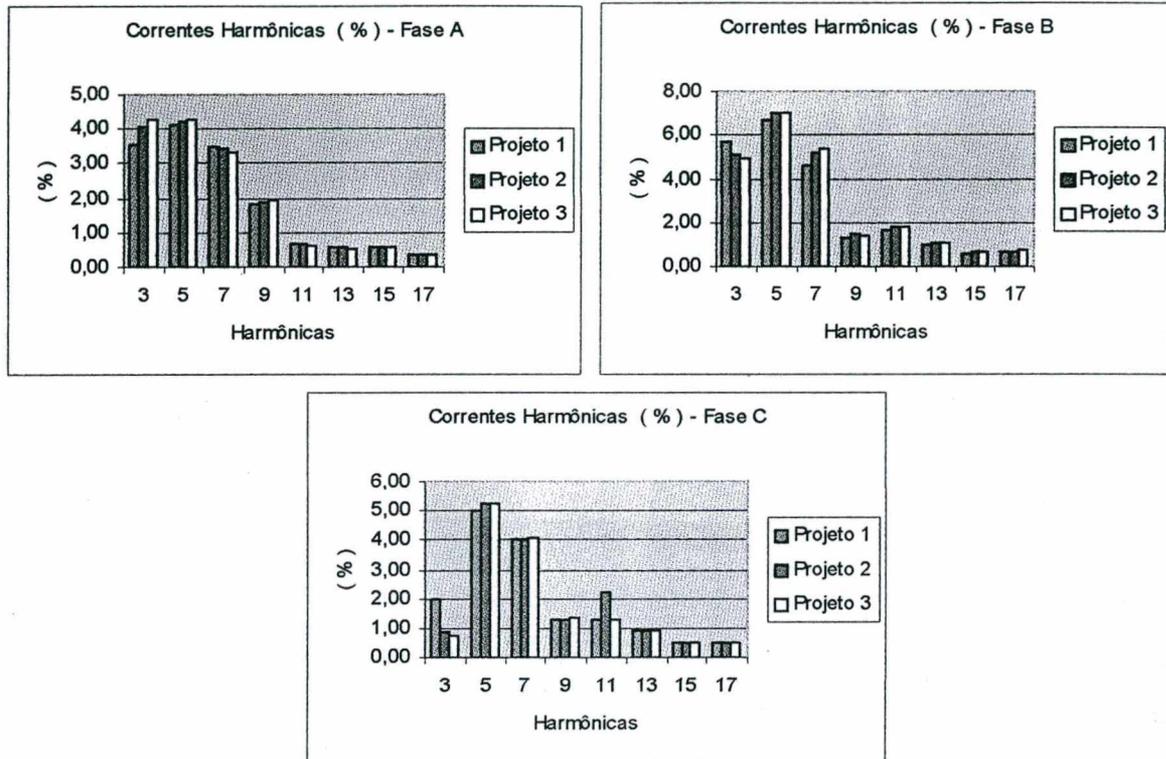


Tabela 4.17 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3^a harmônica.

➤ Sistema Desequilibrado:

Tabela 4.23 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3^a harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	4,03	2,73	8,26	4,42	0,78	6,50	4,67	0,42	6,10
5	5,45	8,24	8,72	5,69	8,77	8,49	5,76	8,69	8,46
7	4,22	4,38	4,28	4,05	4,85	4,30	3,87	4,99	4,43
9	1,37	1,82	2,96	1,44	2,04	3,08	1,52	2,12	3,20
11	1,31	1,85	2,19	1,34	1,99	2,18	1,36	1,90	2,19
13	0,99	0,94	1,13	0,97	1,03	1,16	0,95	1,13	1,19
15	0,52	0,81	1,17	0,54	0,88	1,19	0,53	0,90	1,20

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
17	0,54	0,69	0,70	0,55	0,73	0,70	0,55	0,73	0,69
TDH (%)	8,30	10,98	13,40	8,59	10,56	12,26	8,69	10,56	12,11

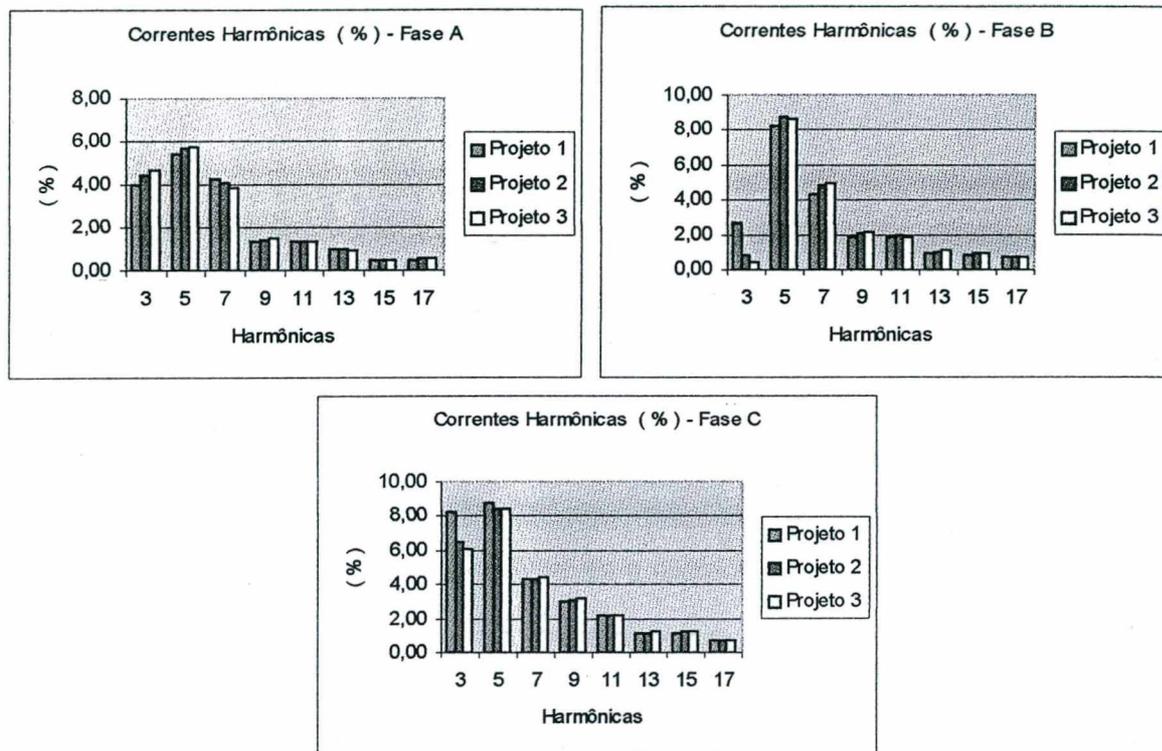


Figura 4.18 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 2 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª. harmônica.

Observa-se que em todos os casos que o uso do elemento bloqueador traz ao sistema redução significativa do conteúdo de terceira harmônica, se comparado com o conteúdo harmônico encontrado para o primeiro projeto (somente com uso do elemento condutor: filtro shunt sintonizado). A melhor resposta encontrada aparece no caso do uso do filtro de bloqueio de neutro, em que o sistema é equilibrado, visto que este filtro apresenta a mesma característica de elevada impedância em todas as fases, caso este que não ocorre na mesma proporção nos casos de desequilíbrio harmônico, principalmente nas harmônicas tríplens. Observa-se porém, que caso seja possível redistribuir as cargas em um sistema desequilibrado, de tal forma que este aproxime-se de uma condição de maior equilíbrio harmônico, poder-se-á ter melhoria significativa na qualidade de bloqueio do elemento bloqueador projetado. Para todos os projetos a seguir será utilizado como padrão o projeto 2, por apresentar resultados muito próximos aos encontrados no projeto 3, e por

tratar-se de um projeto mais econômico e de acarretar menores quedas de tensão sobre o elemento bloqueador.

4.6.3 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado, Filtro de Bloqueio de Neutro e Filtro de Bloqueio de Fase (célula V)

Outra célula de filtragem passível de projeto para instalações de característica comercial de baixa tensão é a que incorpora o filtro shunt sintonizado como elemento condutor e os filtros de bloqueio de neutro e de fase como elemento bloqueador do sistema. Adotando os projetos padrões para os filtros de bloqueio de neutro e shunt sintonizados já analisados, propõe-se 03 (três) projetos para o filtro de bloqueio de fase. Este filtro deverá atuar diretamente sobre a quinta harmônica, uma vez que o filtro de bloqueio de neutro trata de atuar sobre a harmônica de ordem inferior (terceira harmônica).

Os dados de projeto podem ser abaixo observados:

Tabela 4.24 – Dados de projeto obtidos para o elemento condutor da célula de filtragem e para o elemento bloqueador – filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de fase de 5ª harmônica.

	Filtro de Bloqueio de Neutro	Filtro Shunt Sintonizado		Filtro de Bloqueio de Fase (5ª Harmônica)		
	3ª Harmônica	3ª Harmônica	5ª Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Indutância (μH)	200	7.440	3.750	50	100	150
Capacitância (μF)	3910	105	75	5.630	2.815	1.880
Resistência ($\text{m}\Omega$)	50	135	105	10	10	10

Com os valores calculados obtém-se através de simulação o espectro harmônico da corrente nas três situações propostas:

➤ Sistema Equilibrado:

Tabela 4.25 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)
3	1,59	1,43	1,09
5	1,37	0,39	0,19
7	4,89	5,3	5,92
9	2,04	2	1,96

Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)
11	2,01	1,99	1,96
13	0,99	1,01	1,03
15	0,87	0,85	0,82
17	0,73	0,73	0,72
TDH	6,23	6,37	6,71

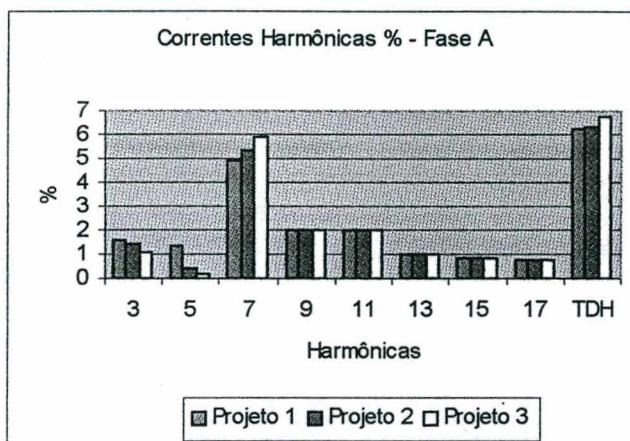


Figura 4.19 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

➤ Sistema Desequilibrado Real (INEP):

Tabela 4.26 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	2,48	2,68	0,23	1,66	2,07	0,17	1,38	1,78	0,43
5	0,57	0,95	0,66	0,16	0,27	0,18	0,09	0,12	0,09
7	3,33	4,01	3,31	3,53	4,32	3,59	3,71	4,65	3,92
9	1,86	1,02	1,01	1,97	1,02	1,05	2,09	1,02	1,09
11	0,64	1,28	0,94	0,68	1,24	0,92	0,74	1,19	0,88
13	0,47	0,78	0,69	0,44	0,8	0,72	0,39	0,81	0,73
15	0,52	0,45	0,39	0,51	0,44	0,38	0,49	0,41	0,38
17	0,35	0,5	0,38	0,36	0,49	0,37	0,37	0,48	0,36
TDH	4,71	5,28	3,76	4,49	5,16	3,97	4,6	5,33	4,27

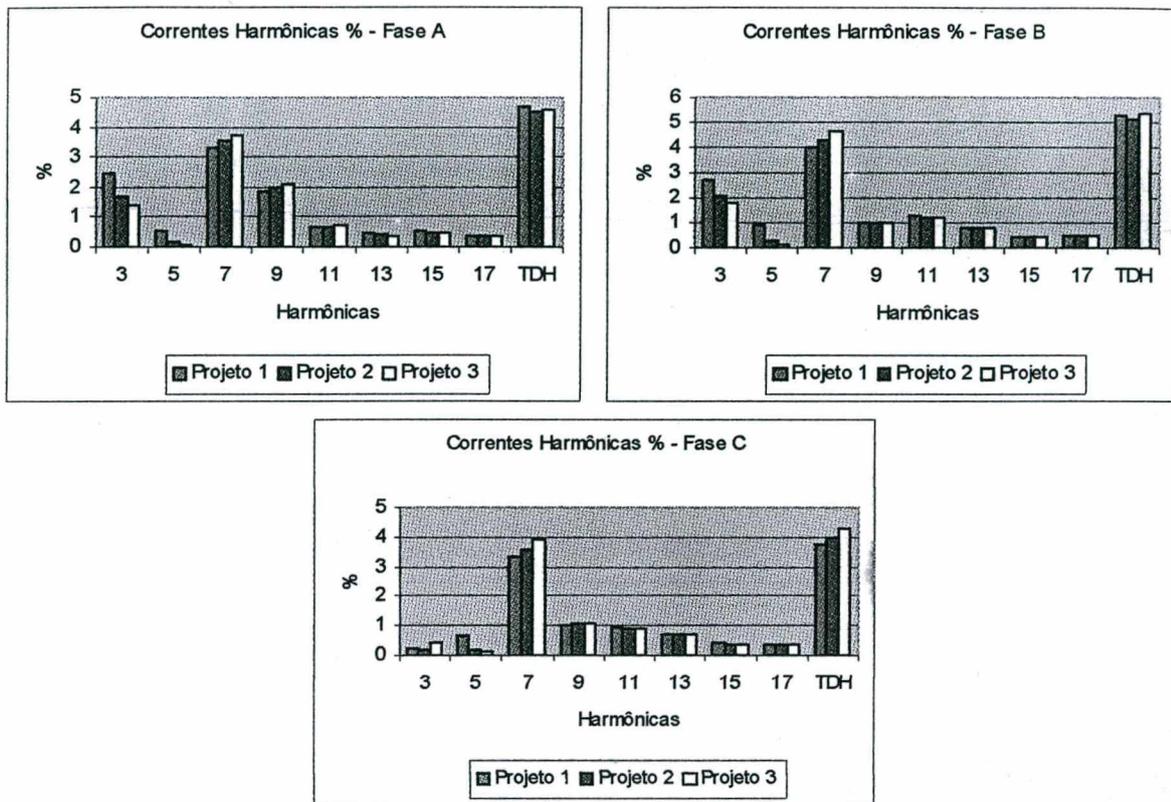


Figura 4.20 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

➤ Sistema Desequilibrado:

Tabela 4.27 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	3,06	0,75	4,64	2,22	1,11	3,29	1,68	1,37	2,39
5	0,94	1,42	1,54	0,27	0,41	0,42	0,14	0,19	0,17
7	4,34	5,22	4,56	4,66	5,71	4,99	5,5	6,27	5,57
9	1,46	1,94	3,03	1,52	1,92	3,05	1,6	1,85	3,04
11	1,28	1,97	2,19	1,24	1,95	2,2	1,17	1,9	2,21
13	0,98	1,04	1,13	0,99	1,06	1,13	0,99	1,08	1,12
15	0,52	0,85	1,17	0,52	0,82	1,16	0,52	0,78	1,14
17	0,53	0,73	0,68	0,5	0,72	0,69	0,48	0,72	0,69
TDH	5,87	6,32	7,87	5,67	6,62	7,3	5,78	7,11	7,36

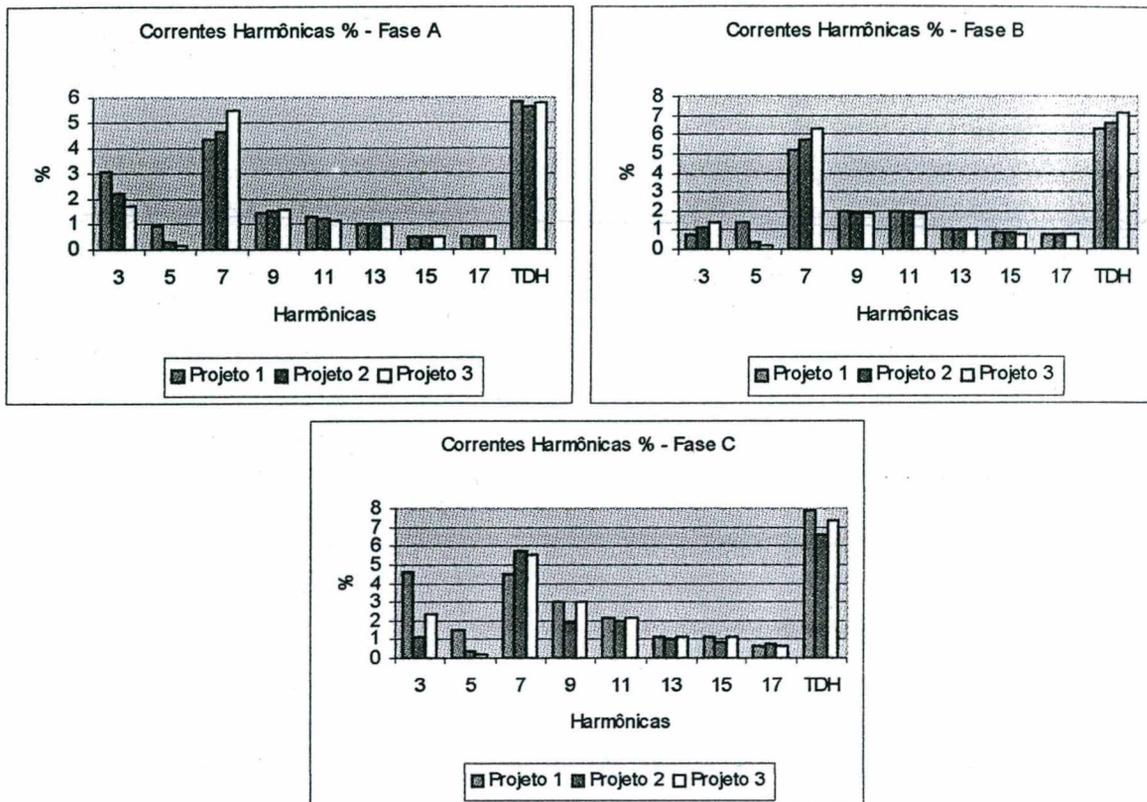


Figura 4.21 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 3 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Observa-se que o elemento bloqueador confere melhora significativa à filtragem shunt sintonizada de 3ª e 5ª harmônicas. O projeto 2 apresenta a melhor relação entre poder de bloqueio / valor de indutância utilizada, visto que um menor valor de indutância acarretará sempre menor queda de tensão nos filtros. O projeto 3 também oferece ótimos resultados, porém traria maiores quedas de tensão e maior peso/volume ao reator.

4.6.4 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado e Dois Filtros de Bloqueio de Fase

Como última proposta de célula de filtragem passível de projeto para as situações apresentadas, encontra-se a possibilidade de uso de filtro shunt sintonizado como elemento condutor e dois filtros de bloqueio paralelo de fase como elemento bloqueador. Utilizando os dados de projeto do filtro de bloqueio de fase paralelo de 5ª harmônica e os dados de projeto dos filtros shunt sintonizados de 3ª e 5ª harmônicas, submete-se a simulação de três

projetos de filtro de bloqueio paralelo de fase de 3^a harmônica, nos três exemplos adotados para análise. Os resultados podem ser observados como segue.

Tabela 4.28 – Dados de projeto obtidos para o elemento condutor da célula de filtragem e para o elemento bloqueador – filtro de bloqueio de neutro de 3^a harmônica e filtro de bloqueio de fase de 5^a harmônica.

	Filtro de Bloqueio de Fase	Filtro Shunt Sintonizado		Filtro de Bloqueio de Fase (3 ^a Harmônica)		
	5 ^a Harmônica	3 ^a Harmônica	5 ^a Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
Indutância (μH)	100	7440	3750	50	100	150
Capacitância (μF)	2815	105	75	15640	7820	5210
Resistência ($\text{m}\Omega$)	10	135	105	10	10	10

Com os valores calculados obtêm-se através de simulação o espectro harmônico da corrente nas três situações propostas:

➤ Sistema Equilibrado:

Tabela 4.29 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3^a harmônica e filtro de bloqueio de 5^a harmônica.

Harmônica	Projeto 1	Projeto 2	Projeto 3
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase A (%)
3	5,86	2,18	1,03
5	0,4	0,4	0,4
7	5,49	5,53	5,61
9	1,81	1,79	1,79
11	1,99	1,98	1,98
13	1,06	1,05	1,05
15	0,81	0,8	0,79
17	0,74	0,73	0,73
TDH	8,61	6,71	6,49

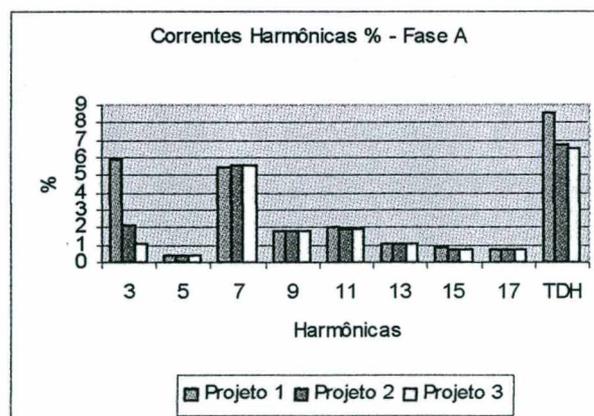


Figura 4.22 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3^a harmônica e filtro de bloqueio de 5^a harmônica.

➤ **Sistema Desequilibrado Real (INEP):**

Tabela 4.30 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	1,67	3,75	2,78	0,63	1,37	1,04	0,29	0,66	0,52
5	0,15	0,26	0,19	0,15	0,26	0,19	0,15	0,26	0,2
7	3,75	4,17	3,49	3,8	4,22	3,53	3,85	4,28	3,57
9	1,9	1,07	1	1,92	1,06	1,01	1,95	1,66	1,01
11	0,72	1,24	0,94	0,73	1,23	0,93	0,74	1,22	0,93
13	0,46	0,8	0,71	0,45	0,8	0,71	0,44	0,8	0,71
15	0,51	0,45	0,37	0,51	0,45	0,37	0,5	0,44	0,37
17	0,38	0,49	0,38	0,37	0,49	0,38	0,38	0,48	0,38
TDH	4,65	5,94	4,76	4,43	4,84	4,04	4,46	4,75	3,97

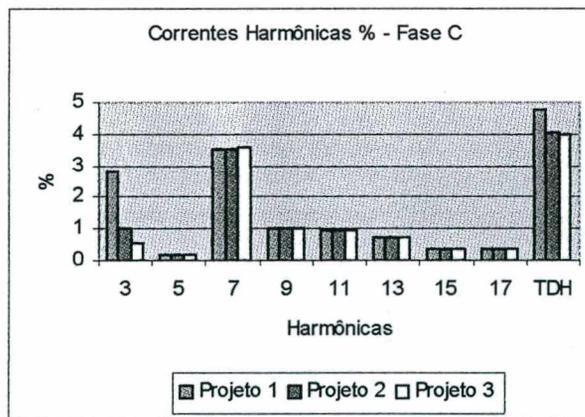
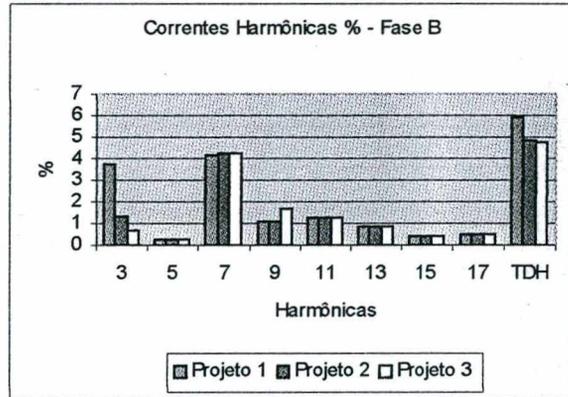
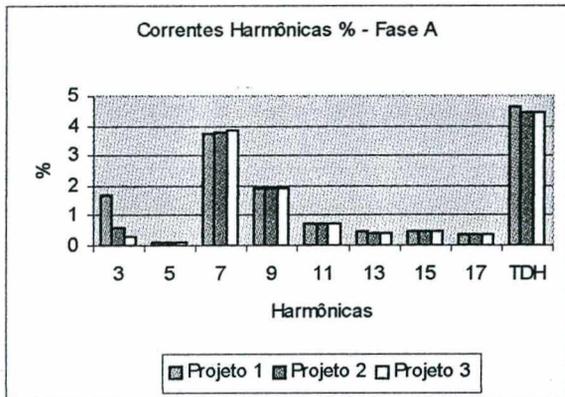


Figura 4.23 – Correntes harmônicas percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

➤ **Sistema Desequilibrado:**

Tabela 4.31 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Harmônica	Projeto 1			Projeto 2			Projeto 3		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	3,69	5,84	7,63	1,37	2,15	2,83	0,64	1,07	1,43
5	0,29	0,39	0,17	0,29	0,39	0,42	0,28	0,39	0,41
7	5,14	5,47	5,04	5,2	5,53	5,34	5,28	5,63	5,16
9	1,48	1,81	2,78	1,49	1,79	2,78	1,51	1,78	2,77
11	1,18	1,99	2,25	1,17	1,98	2,24	1,15	1,98	2,24
13	1,04	1,05	1,09	1,04	1,05	1,08	1,04	1,05	1,08
15	0,54	0,81	1,12	0,53	0,8	1,12	0,53	0,79	1,11
17	0,49	0,74	0,72	0,48	0,74	0,71	0,47	0,73	0,72
TDH	6,73	8,59	9,98	5,85	6,69	7,03	5,79	6,5	6,67

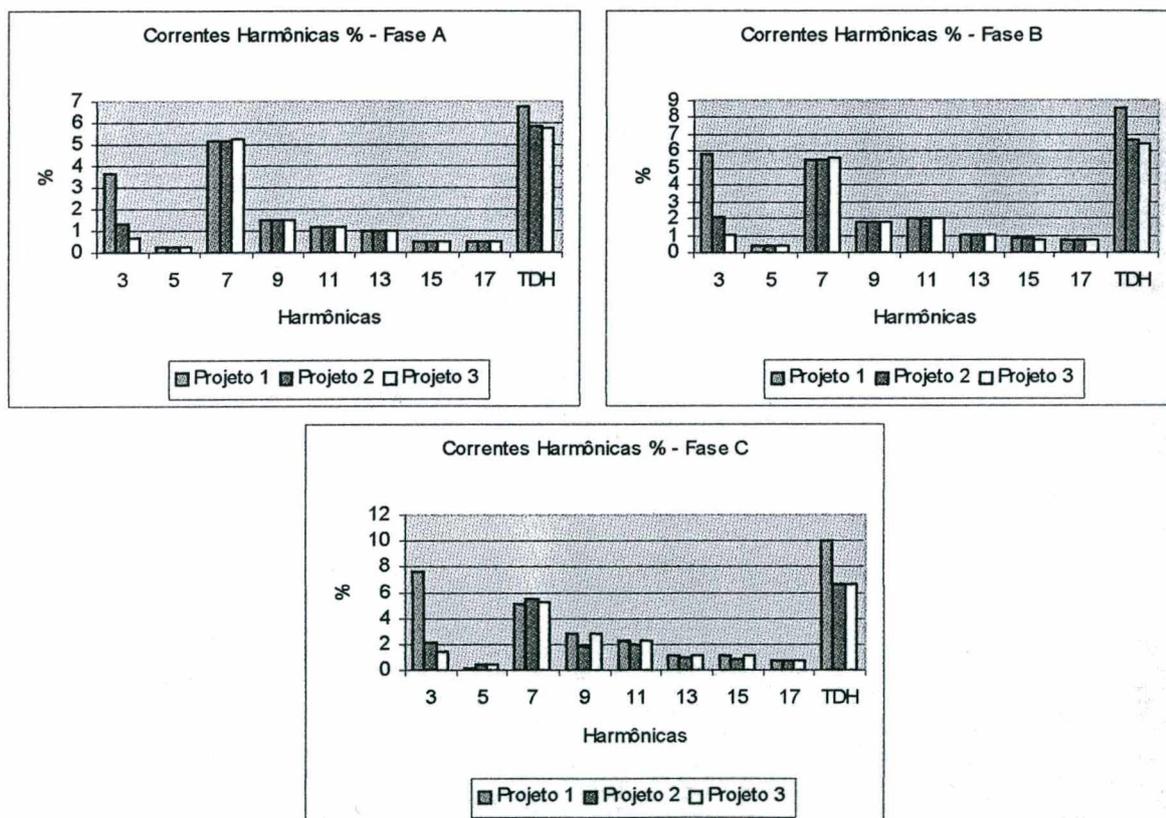


Figura 4.24 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª harmônica e filtro de bloqueio de 5ª harmônica.

Como observado no item [4.6.3] pode-se concluir que a melhor relação de valores obtidos para o projeto do filtro de bloqueio é o apresentado no projeto 2. Há pouca diferença de qualidade de filtragem entre os resultados alcançados no projeto 2 em relação ao projeto 3. Valores menores do que 100µH para o indutor do elemento de filtragem

provavelmente trariam poucas vantagens ao sistema, além de acarretar pouca diferença de queda de tensão em relação ao valor proposto.

4.6.5 – Célula de Filtragem Composta por Filtro Shunt Sintonizado, Dois Filtros de Bloqueio de Fase e um Filtro de Bloqueio de Neutro

Considerando todos os estudos apresentados se poderia pensar em qual a melhor estrutura passível de utilização, de tal forma que as harmônicas de corrente fossem praticamente anuladas. Tomando todos os resultados anteriores pode-se sugerir um conjunto de dois filtros de bloqueio paralelo de fase de elevado fator de bloqueio, associado ainda à presença de um filtro de bloqueio de terceira harmônica de elevado poder de bloqueio. Os filtros shunt sintonizados continuariam a propiciar um baixo caminho de impedância às harmônicas de mesma ordem dos mesmos. Tomando estes pontos como base de projeto obtém-se através de simulações os resultados abaixo ilustrados para as três situações estudadas.

Tabela 4.32 – Dados de projeto obtidos para o elemento condutor da célula de filtragem e para o elemento bloqueador – filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica, filtro de bloqueio de fase de 5ª harmônica e 5ª harmônica.

	Filtro de Bloqueio de Neutro	Filtro Shunt Sintonizado		Filtro de Bloqueio de Fase	
	3a. Harmônica	3a. Harmônica	5a. Harmônica	3a. Harmônica	5a. Harmônica
Indutância (μH)	200	7.440	3.750	200	150
Capacitância (μF)	3.910	105	75	3.910	1.880
Resistência ($\text{m}\Omega$)	50	135	105	10	10

Tabela 4.33 – Valores de correntes percentuais obtidos em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª e 5ª harmônica e filtro de bloqueio de neutro de 5ª harmônica.

Harmônica	Equilibrado			Desequilibrado			Desequilibrado (INEP)		
	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)	Corrente Fase A (%)	Corrente Fase B (%)	Corrente Fase C (%)
3	0,37	0,22	0,44	0,18	0,41	0,61	0,42	0,28	0,2
5	0,2	0,15	0,15	0,13	0,18	0,19	0,81	0,12	0,08
7	6,39	6,36	6,37	5,27	6,75	6,12	4,36	4,94	4,18
9	1,93	1,92	1,94	1,72	1,79	3,02	2,45	1,01	1,13
11	1,92	1,92	1,9	1,08	1,85	2,22	0,89	1,14	0,85
13	1,07	1,07	1,07	0,99	1,11	1,12	0,4	0,82	0,74
15	0,78	0,78	0,77	0,54	0,75	1,13	0,53	0,4	0,38
17	0,73	0,74	0,73	0,46	0,71	0,69	0,42	0,46	0,35
TDH	7,12	7,1	7,1	5,89	7,4	7,41	5,14	5,28	4,5

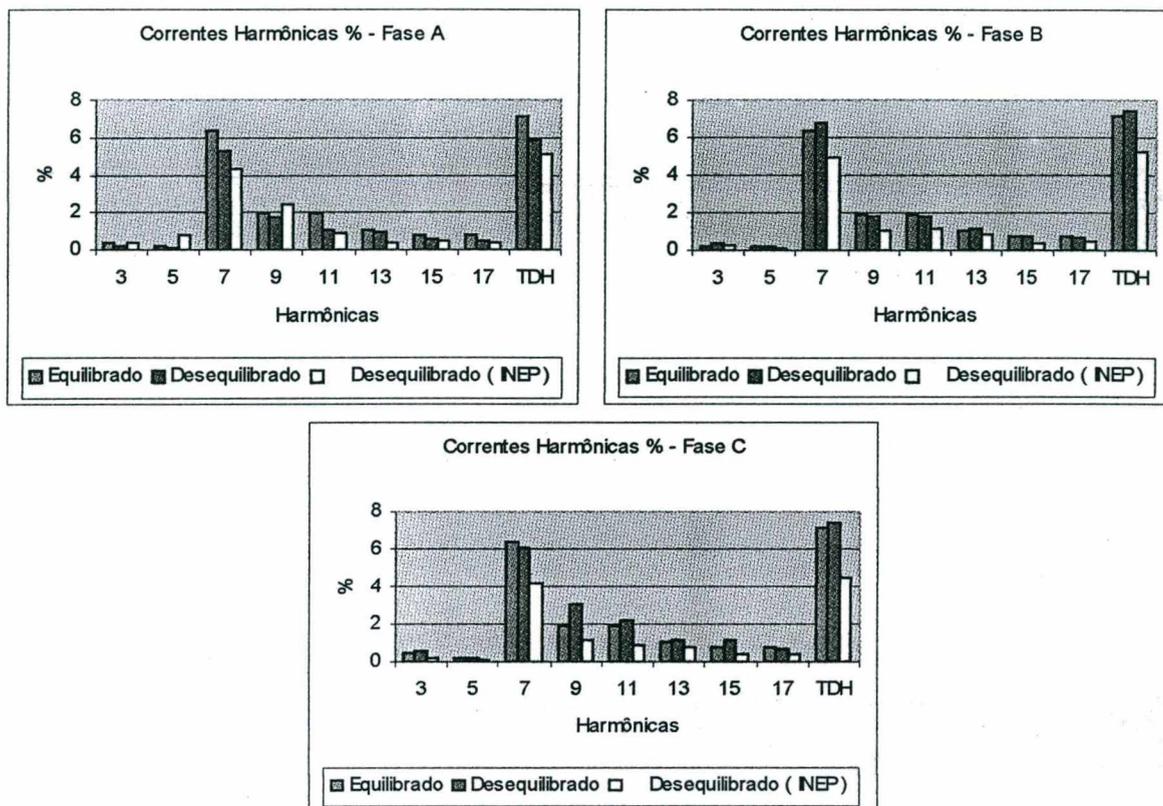


Figura 4.25 – Correntes harmônicas percentuais obtidas em simulação para célula de filtragem 4 - elemento condutor: filtro shunt sintonizado e elemento bloqueador: filtro de bloqueio de fase de 3ª e 5ª harmônica e filtro de bloqueio de neutro de 5ª harmônica.

Pode-se observar que em todos os três casos estudados, o uso da potencialidade máxima de bloqueio projetada inicialmente para cada configuração isolada de filtro de bloqueio leva a uma resposta de excelente qualidade em termos de filtragem harmônica. Consegue-se desta forma anular todo o conteúdo de quinta e de terceira harmônicas que circulam pelo neutro do alimentador. Nos três casos os resultados obtidos são muito próximos, pois a qualidade de bloqueio e filtragem shunt apresenta-se maximizada, desta forma tanto um sistema equilibrado como um sistema completamente desequilibrado observará elevada impedância nas frequências harmônicas dos filtros projetados. Observa-se que existe grande melhora na qualidade de bloqueio quando da associação dos filtros de bloqueio paralelo de neutro e de fase ao sistema. Este projeto seria em suma o que poderia apresentar os melhores resultados em termos de filtragem passiva para instalações de baixa tensão de característica comercial. Seu custo / benefício deve então ser analisado em relação a todas as demais alternativas levantadas no estudo, para desta forma encontrar a melhor célula de filtragem passível de utilização (e seus parâmetros associados) para ser implementada.

4.7 – Conclusão

Todas as células de filtragem apresentadas neste capítulo podem ser amplamente utilizadas para implementar projeto de filtragem passiva em instalações comerciais de baixa tensão. Os filtros de bloqueio apresentam-se como elementos de elevado poder de influência na qualidade da filtragem passiva, aumentando sua influência a medida que eleva-se seu poder de bloqueio e o número de filtros constituintes do elemento bloqueador da célula de filtragem. Com as técnicas de células de filtragem pode-se projetar filtros passivos de forma a atenuar com excelente qualidade harmônicas em sistemas elétricos de característica comercial.

Capítulo 5 – Verificação Prática - Bancada de Estudos

5.1 – Objetivo da Bancada de Estudos

O objetivo inicial de desenvolver uma bancada de estudos de filtros passivos para correção de distorção harmônica em sistemas elétricos de baixa tensão, foi a de avaliar experimentalmente os dados obtidos nos estudos e simulações apresentados nos Capítulos 2, 3 e 4 deste trabalho. De uma forma geral procurou-se desenvolver uma estrutura que possibilitasse observar os aspectos de funcionamento dos filtros em geral. Cabe destacar que com o auxílio desta bancada pode-se verificar os seguintes comportamentos:

- O comportamento de todas as células de filtragem apresentadas nos estudos teóricos e por simulações.
- O comportamento de filtros shunt sintonizados em ambientes de elevado fator de deslocamento.
- A ocorrência de perda de sintonia de filtros shunt sintonizados e suas repercussões sistêmicas.
- Obtenção de ressonância paralela entre filtros shunt sintonizados e suas conseqüências.
- O uso de filtros de bloqueio paralelos de fase e suas conseqüências.
- O uso de filtros de bloqueio paralelos de neutro e suas conseqüências.
- As conseqüências da perda de sintonia nos filtros de bloqueio paralelos de fase e de neutro.
- Avaliar todas as possibilidades de filtragem em ambientes que contemplem cargas balanceadas e desbalanceadas.

Através de todos estes pontos citados pode-se observar que a bancada de testes para filtros passivos possui grande capacidade de revelar fenômenos importantíssimos em termos de caracterização de efeitos que podem ocorrer no uso destes equipamentos.

5.2 – Layout do Projeto da Bancada de Testes

O layout básico de projeto para esta bancada constitui-se do uso dos seguintes dispositivos:

Conjunto de filtros shunt sintonizados:

- (a) Filtro Shunt Sintonizado de 3^a. Harmônica (180 Hz)
- (b) Filtro Shunt Sintonizado de 5^a. Harmônica (300 Hz)
- (c) Filtro Shunt Sintonizado de 7^a. Harmônica (420 Hz)

Conjunto de filtros de bloqueio:

- (a) Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase de 3^a. Harmônica (180 Hz)
- (b) Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase de 5^a. Harmônica (300 Hz)
- (c) Filtro de Bloqueio Paralelo de Fase de 7^a. Harmônica (420 Hz)
- (d) Filtro de Bloqueio Paralelo de Neutro de 3^a. Harmônica (180 Hz)
- (e) Filtro de Bloqueio Série

Cargas:

- (a) Retificadores monofásicos não-controlados com filtro capacitivo

A disposição dos elementos está apresentada na figura 5.1.

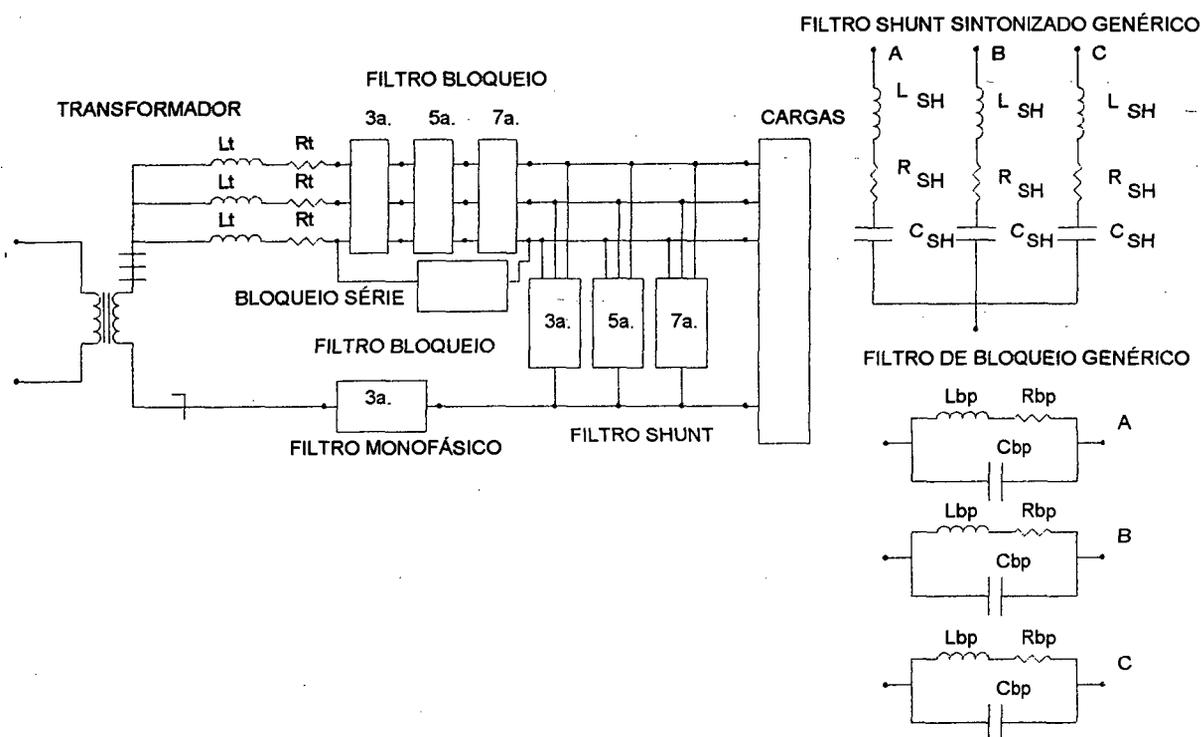


Figura 5.1 – Disposição dos elementos da bancada de estudos.

O projeto dos filtros shunt e de bloqueio foi feito através das equações apresentadas nos capítulos 2 e 3, sendo também utilizadas como ferramentas de projeto os apêndices A e B. Foram portanto obtidos os seguintes valores para os componentes dos filtros:

Tabela 5.1 – Dados obtidos com o cálculo dos reatores e capacitores dos filtros shunt sintonizados e de bloqueio.

Filtro	Shunt de 3 ^a	Shunt de 5 ^a	Shunt de 7 ^a	Bloq Par 3 ^a	Bloq Par 5 ^a	Bloq Par 7 ^a	Bloq Série
Material (Chapa)	4HS600L	4HS508L	4HS508L	4HS220	4HS220	4HS220	4HS400
Corrente Nominal (A)	12	12	12	14	14	14	12
Ocupação da Janela (%)	20	27,7	25,5	20,6	20,6	20,6	26,4
Número de Espiras	150	95		20	20	20	80
Entreferro (mm)	2,42	2,3	2,06	0,12	0,12	0,12	0,6
Peso Total (kg)	20,4	13,5	13,2	0,65	0,65	0,65	4
a (mm)	60	50,8	50,8	22	22	22	40
b (mm)	60	50,8	50,8	22	22	22	40

Filtro	Shunt de 3ª	Shunt de 5ª	Shunt de 7ª	Bloq Par 3ª	Bloq Par 5ª	Bloq Par 7ª	Bloq Série
Número de AWG 12	1	1	1	1	1	1	1
Fator de Qualidade	35	31	31,5	x	x	x	x
Resistência Equivalente (mΩ)	670	570	525	17	17	17	132
Capacitância Equivalente (μF)	38,25	30,6	22,95	3900	1407	720	1407
Indutância (μH)	20440	9200	6250	200	200	200	5000
Número de Reatores	3	3	3	4	3	3	3

A tabela 5.1 já apresenta os valores do capacitor e do indutor equivalentes de cada filtro, especificando ainda os valores das grandezas do indutor a ser construído, uma vez que optou-se por desenvolvê-lo no laboratório, acrescentando grande bagagem prática ao trabalho e revelando deste modo todas as dificuldades práticas envolvidas em sua construção. Para os filtros de bloqueio série foram utilizados capacitores para partida de motores, uma vez que os capacitores necessitariam possuir elevado valor de capacitância, com baixa queda de tensão sobre os mesmos. Devido ao fato de não se encontrar no mercado esse tipo de capacitor, optou-se pela especificação técnica mais favorável, fato este que levou ao emprego dos capacitores para partida de motores. O único problema porém de seu uso é o fato da temperatura dos capacitores não poder ser superior a 65° C.

Os capacitores escolhidos para os filtros shunt sintonizados foram doados pela empresa WEG (Jaraguá do Sul – SC), perfazendo um total de 27 capacitores de 15,3μF/380V_{AC}. A disposição dos mesmos pode ser visualizada na figura 5.2.

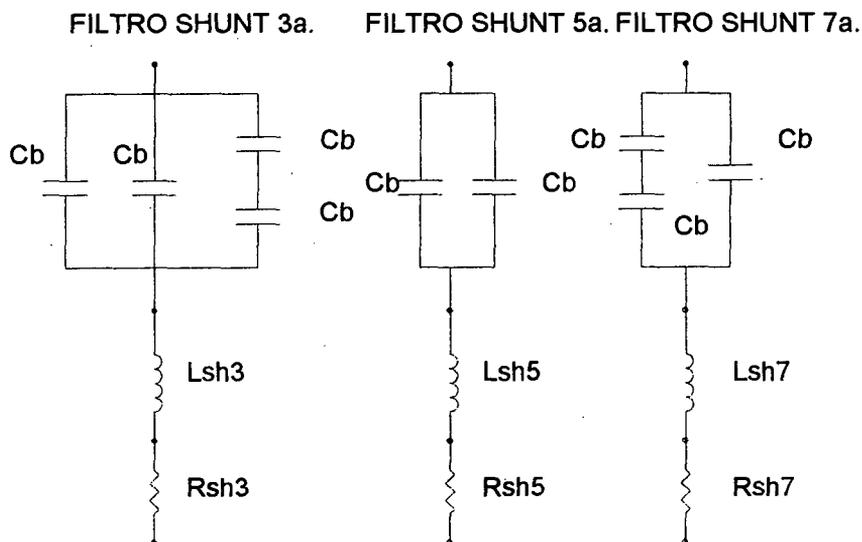


Figura 5.2 – Disposição dos elementos constituintes dos filtros shunt sintonizados.

Como cargas foram utilizados três retificadores monofásicos com filtro capacitivo, de potência máxima de 900W cada. Os valores dos elementos constituintes de cada retificador estão a seguir listados.

Ponte retificadora: SKB25/08
 Indutor: $L_r = 200\mu\text{H}$
 Capacitor: $C_r = 1.880\mu\text{F}$
 Resistência: $R_r = 120/60/40/30\Omega$

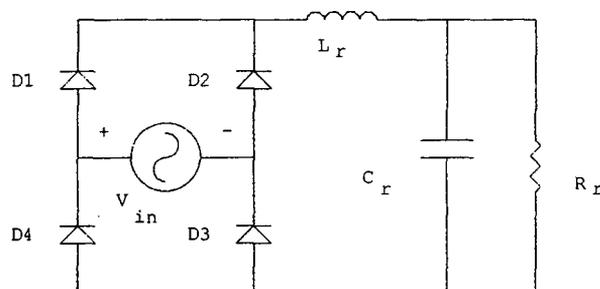


Figura 5.3 – Carga monofásica: ponte retificadora monofásica com filtro capacitivo.

Através desta bancada foram realizadas as seguintes simulações de cargas e filtros:

- (1) Sistema sem filtros sintonizados
- (2) Sistema com filtros shunt sintonizados de 3^a harmônica
- (3) Sistema com filtros shunt sintonizados de 3^a e 5^a harmônicas
- (4) Sistema com filtros shunt sintonizados de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas
- (5) Sistema com filtro shunt sintonizado de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas e filtros de bloqueio de 3^a harmônica de fase
- (6) Sistema com filtro shunt sintonizado de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas e filtros de bloqueio de 3^a harmônica de fase e 3^a harmônicas de neutro
- (7) Sistema com filtro shunt sintonizado de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas e filtros de bloqueio de 3^a harmônica de neutro
- (8) Sistema com filtro shunt sintonizado de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas e filtros de bloqueio de 3^a e 5^a harmônicas de fase e 3^a harmônica de neutro
- (9) Sistema com filtro shunt sintonizado de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas e filtros de bloqueio de 3^a, 5^a e 7^a harmônicas de fase e 3^a harmônica de neutro

Desta forma grande parte da potencialidade da bancada para este estudo pode ser determinada e analisada. A seguir apresentam-se os resultados obtidos.

5.3 – Resultados Obtidos para Carga Equilibrada

Seguindo a configuração e correspondente numeração apresentada no item 5.1 e utilizando-se potência monofásica de 700W em cada retificador e tensão de fase de $200V_{\text{pico}}$ verificou-se os seguintes resultados experimentais:

• **Caso 1:**

Com o uso somente das cargas não-lineares (RMFC) obteve-se os seguintes resultados na saída do secundário do transformador:

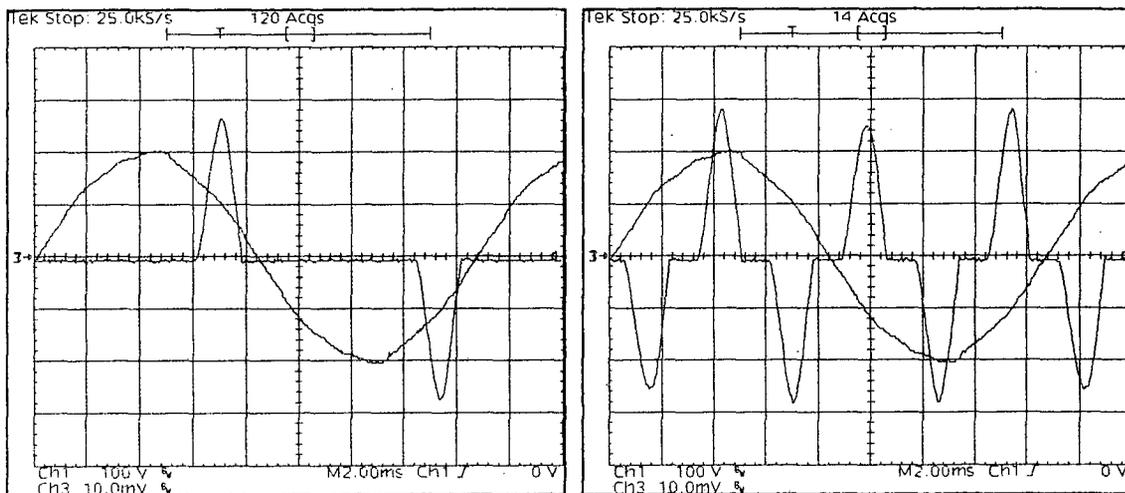


Figura 5.4 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda ; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

Tabela 5.2 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase e corrente de neutro.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro
60 Hz	140 V	100.00%	4,32 A	100.00%	0,0278 A
180 Hz	1.29 V	0.92%	4,03 A	93.41%	12,2 A
300 Hz	2.6 V	1.85%	3,51 A	81.37%	0,301 A
420 Hz	1.54 V	1.10%	2,82 A	65.26%	0,805 A
540 Hz	1.07 V	0.77%	2,06 A	47.76%	6,24 A
660 Hz	949 mV	0.68%	1,33 A	30.90%	0,399 A
780 Hz	437 mV	0.31%	0,731 A	16.92%	0,222 A
900 Hz	173 mV	0.12%	0,292 A	6.75%	0,841 A
1.02 kHz	200 mV	0.14%	0,094 A	2.18%	0,154 A
1.14 kHz	548 mV	0.39%	0,137 A	3.17%	0,242 A
1.26 kHz	138 mV	0.10%	0,13 A	3.02%	0,469 A
1.38 kHz	312 mV	0.22%	0,0717 A	1.66%	0,342 A
1.5 kHz	85.8 mV	0.06%	0,022 A	0.51%	0,0967 A
1.62 kHz	46.5 mV	0.03%	0,0626 A	1.45%	0,246 A
1.74 kHz	6.28 mV	0.00%	0,0835 A	1.93%	0,0536 A
1.86 kHz	234 mV	0.17%	0,0802 A	1.86%	0,0643 A

Observa-se elevado conteúdo harmônico de baixa frequência, com TDH de tensão na ordem de 2,64% e da corrente de fase na ordem de 152,35%. A distorção harmônica da tensão encontra-se de acordo com as normas, porém o mesmo não ocorre com a corrente de fase. Observa-se ainda elevado conteúdo de 3ª harmônica no neutro do sistema.

• **Caso 2:**

Neste caso insere-se os filtros shunt de 3ª harmônica ao sistema. Obtém-se desta forma os seguintes resultados:

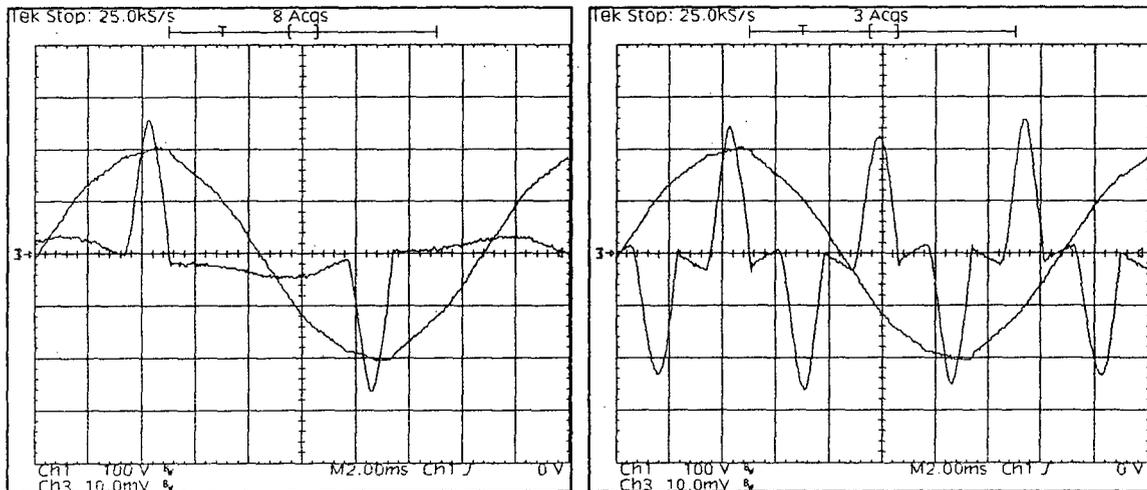


Figura 5.5 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e Tensão de Fase (100V/div) – direita.

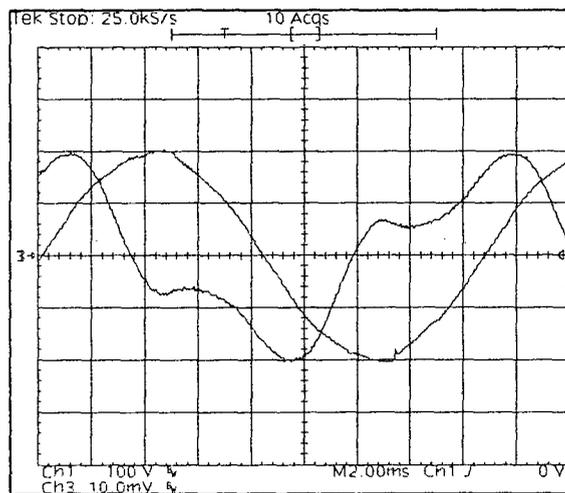


Figura 5.6 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div).

Tabela 5.3 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro e corrente do filtro de 3ª harmônica.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a
60 Hz	140 V	100.00%	4,91 A	100.00%	0,450 A	2,2 A
180 Hz	576 mV	0.41%	3,33 A	67.87%	10.4 A	0,8 A
300 Hz	2.5 V	1.78%	3,49 A	71.05%	0,318 A	0,1 A
420 Hz	1.58 V	1.12%	2,82 A	57.47%	0,167 A	0,030 A
540 Hz	955 mV	0.68%	2,06 A	41.97%	6,24 mA	0,020 A
659 Hz	1.01 V	0.72%	1,32 A	26.89%	0,389 A	0,015 A
779 Hz	408 mV	0.29%	0,701 A	14.27%	0,271 A	0,05 A
899 Hz	132 mV	0.09%	0,246 A	5.00%	0,835 A	0,0 A
1.02 kHz	144 mV	0.10%	0,0302 A	0.62%	0,161 A	0,0 A
1.14 kHz	453 mV	0.32%	0,152 A	3.10%	0,246 A	0,05 A

Freq	V fase	V fase%	I fase	I fase%	I neutro	I shunt 3a
1,26 kHz	112 mV	0,08%	0,151 A	3,07%	0,500 A	0,0 A
1,38 kHz	333 mV	0,24%	0,102 A	2,08%	0,35 A	0,0 A
1,62 kHz	90 mV	0,06%	0,138 A	2,81%	0,230 A	0,0 A
1,86 kHz	211 mV	0,15%	0,139 A	2,84%	0,0539 A	0,0 A

Observa-se leve redução da corrente de 3ª harmônica de neutro e de fase, sem porém influenciar significativamente o espectro harmônico encontrado no caso 1. A TDH de tensão encontra-se em 2,45% e a TDH da corrente de fase em 125,42%.

• **Caso 3:**

Neste caso foram inseridos os filtros shunt de 3ª e 5ª harmônicas, obtendo-se os seguintes resultados:

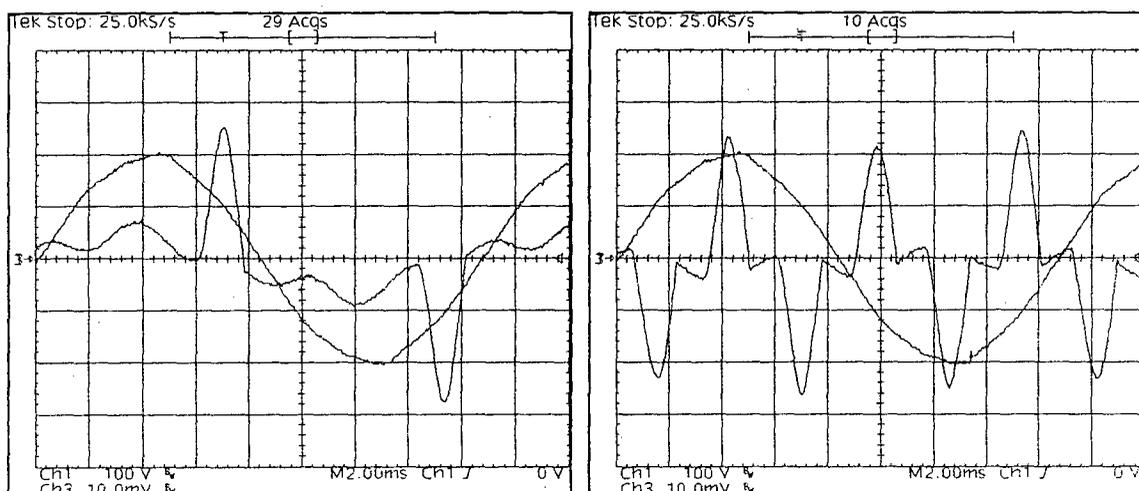


Figura 5.7 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

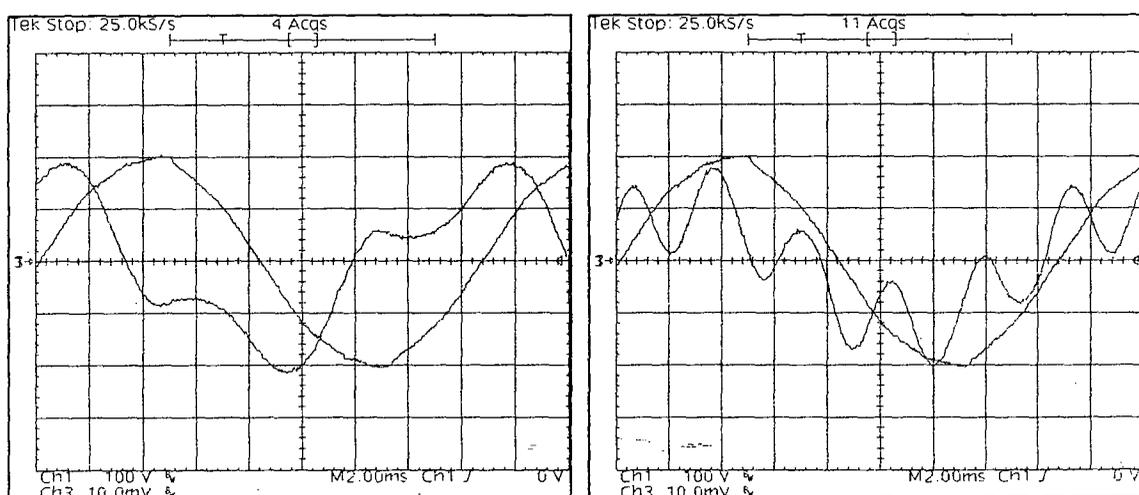


Figura 5.8 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente do filtro shunt de 5ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

Tabela 5.4 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro de 3ª e 5ª harmônicas.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a.	I shunt 5a.
60 Hz	140 V	100.00%	5,81 A	100.00%	0,448 A	2,2 A	1,622
180 Hz	682 mV	0.49%	3,08 A	52.96%	10,3 A	0,834 A	0,067
300 Hz	2.32 V	1.65%	4,53 A	77.91%	0,529 A	0,0848 A	1,1 A
420 Hz	1.39 V	0.99%	2,69 A	46.33%	0,158 A	0,027 A	0,0844 A
540 Hz	963 mV	0.69%	2,0 A	34.40%	6,03 A	0,019 A	0,0426 A
660 Hz	847 mV	0.60%	1,24 A	21.43%	0,337 A	0,132 A	0,038 A
780 Hz	268 mV	0.19%	0.679 A	11.69%	0,283 A	0,0546 A	0,013 A
900 Hz	193 mV	0.14%	0,255 A	4.39%	0,674 A	0,0 A	0,0 A
1.02 kHz	284 mV	0.20%	0,0434 A	0.75%	0,129 A	0,0 A	0,0 A
1.14 kHz	460 mV	0.33%	0,118 A	2.03%	0,243 A	0,0 A	0,0 A
1.26 kHz	83.3 mV	0.06%	0,105 A	1.80%	0,505 A	0,0 A	0,0 A
1.38 kHz	255 mV	0.18%	0,0452 A	0.78%	0,0602 A	0,0 A	0,0 A
1.5 kHz	150 mV	0.11%	0,0317 A	0.55%	0,122 A	0,0 A	0,0 A
1.62 kHz	79.9 mV	0.06%	0,0822 A	1.42%	0,274 A	0,0 A	0,0 A
1.74 kHz	101 mV	0.07%	0,0942 A	1.62%	0,0632 A	0,0 A	0,0 A
1.86 kHz	164 mV	0.12%	0,0735 A	1.26%	0,0629 A	0,0 A	0,0 A

Observa-se neste caso que o filtro shunt de 5ª harmônica não possui atuação na filtragem da respectiva harmônica, a qual apresenta elevação em relação ao valor encontrado no caso 2. Este fato decorre da inserção de harmônicos da própria rede elétrica no filtro shunt sintonizado de 5ª harmônica. A TDH de corrente encontra-se em 113,31% e da tensão em 2,26%.

• **Caso 4:**

Neste caso foram inseridos todos os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, obtendo os resultados abaixo apresentados:

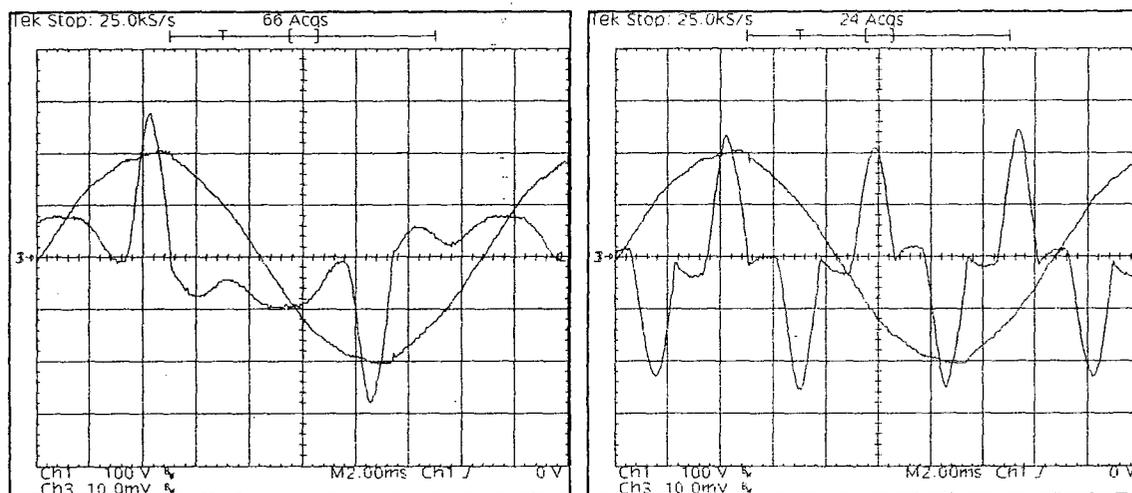


Figura 5.9 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

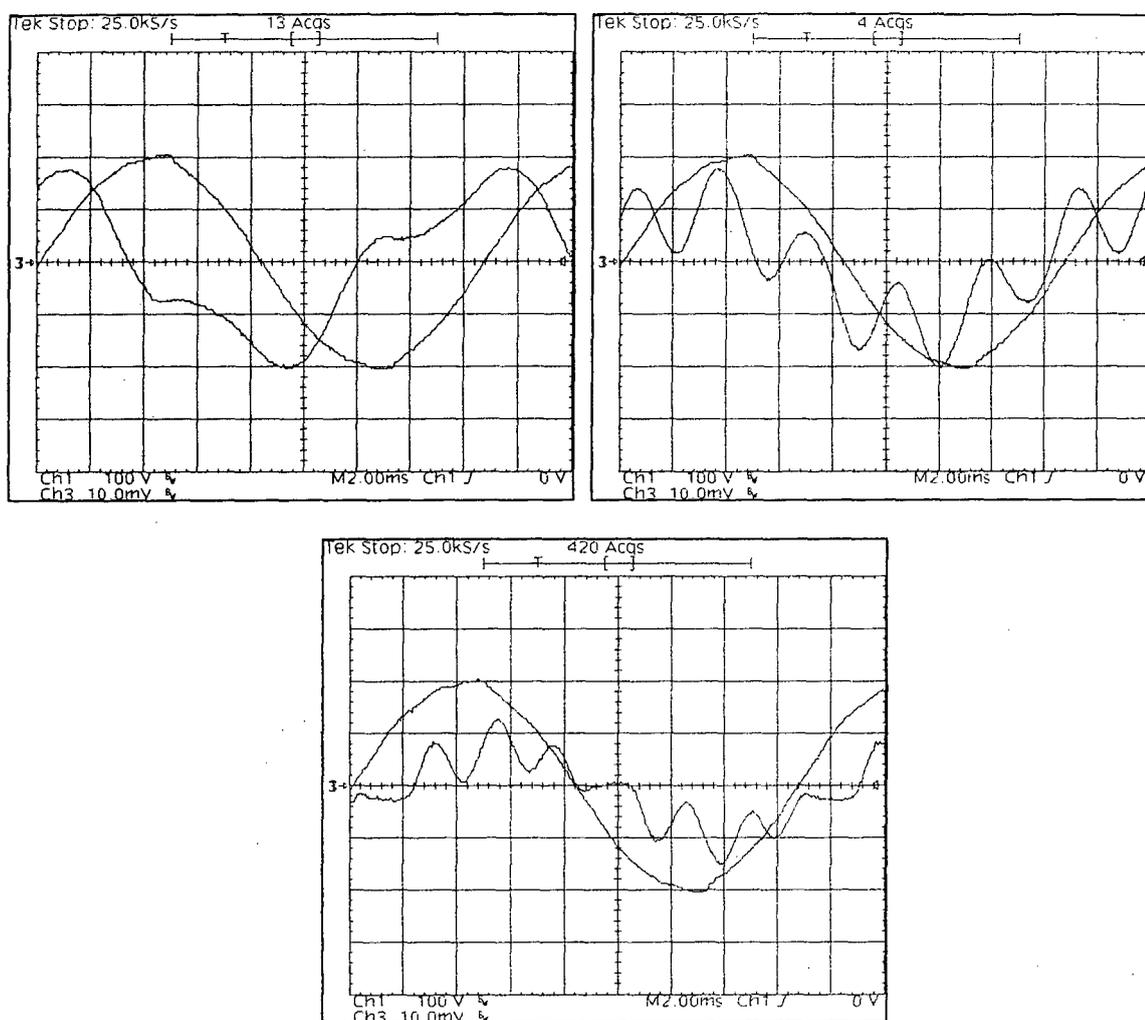


Figura 5.10 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente do filtro shunt de 5ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita; corrente do filtro shunt de 7ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – abaixo.

Tabela 5.5 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas.

Freq	V.fase	V.fase%	I.fase	I.fase%	I.neutro	I.shunt 3a	I.shunt 5a	I.shunt 7a
60 Hz	142 V	100.00%	6,71 A	100.00%	0,450 A	2,22 A	1,68 A	1,19 A
180 Hz	561 mV	0.40%	3,33 A	49.58%	10,5 A	0,748 A	0,064 A	0,076 A
300 Hz	2.38 V	1.68%	4,9 A	73.04%	0,656 A	0,0842 A	1,104 A	0,149 A
420 Hz	1.38 V	0.97%	3,28 A	48.90%	0,180 A	0,030 A	0,088 A	0,514 A
540 Hz	860 mV	0.61%	1,88 A	27.98%	5,74 mA	0,020 A	0,038 A	0,153 A
659 Hz	855 mV	0.60%	1,14 A	17.04%	0,372 A	0,012 A	0,035 A	0,077 A
779 Hz	274 mV	0.19%	0,576 A	8.59%	0,288 A	0,0 A	0,012 A	0,013 A
899 Hz	50.8 mV	0.04%	0,157 A	2.34%	0,612 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.02 kHz	284 mV	0.20%	0,0905 A	1.35%	0,126 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.14 kHz	484 mV	0.34%	0,178 A	2.66%	0,234 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.26 kHz	85.7 mV	0.06%	0,177 A	2.63%	0,511 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.38 kHz	320 mV	0.23%	0,134 A	1.99%	0,069 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.5 kHz	107 mV	0.08%	0,124 A	1.84%	0,108 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.62 kHz	57.3 mV	0.04%	0,140 A	2.09%	0,261 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.74 kHz	53.7 mV	0.04%	0,147 A	2.19%	0,068 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A
1.86 kHz	214 mV	0.15%	0,115 A	1.72%	0,031 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A

Observa-se que o filtro shunt sintonizado de 7ª harmônica apresenta-se a filtrar o componente harmônico de mesma frequência, porém com elevação da harmônica na entrada do transformador, decorrente também do fato da entrada de harmônicos da rede de alimentação no filtro shunt sintonizado de 7ª harmônica. A TDH da tensão apresenta-se na ordem de 2,24% e da corrente de fase da entrada em 106,65%, fora das normas internacionais.

• **Caso 5:**

Este é o primeiro caso em que utiliza-se os filtros de bloqueio, sendo portanto utilizados os filtros de bloqueio de fase de 3ª harmônica, conjuntamente com os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. Os resultados podem ser abaixo observados.

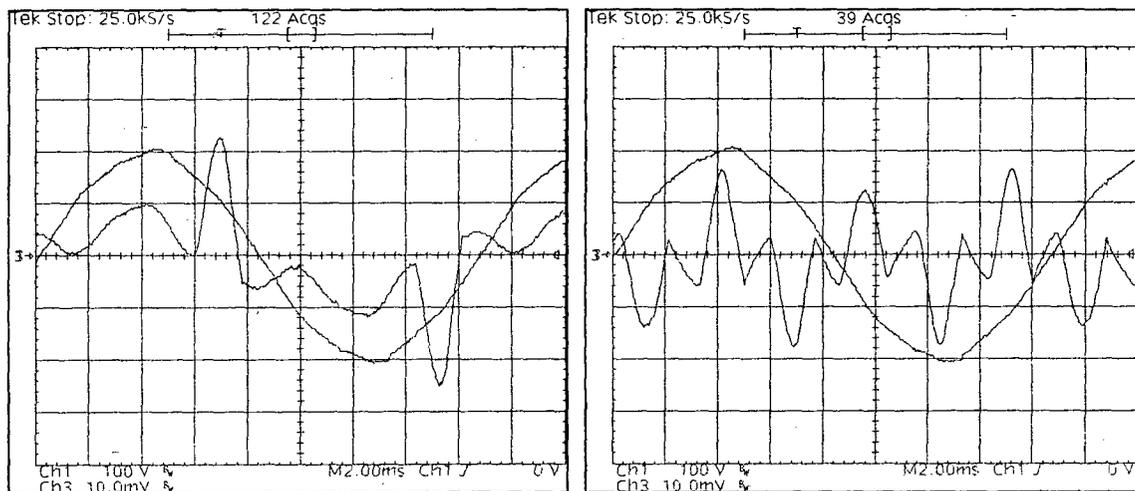


Figura 5.11 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

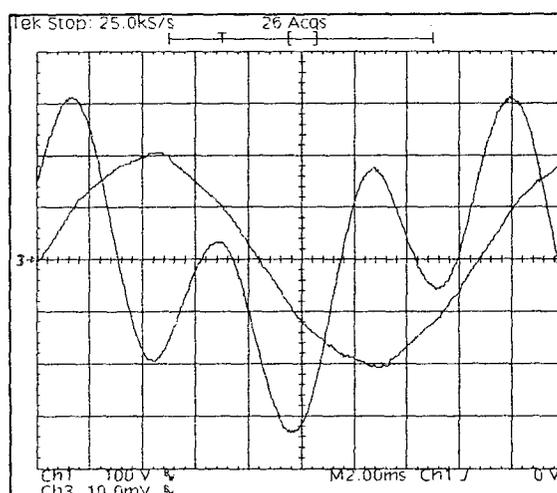


Figura 5.12 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div).

Tabela 5.6 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro de 3ª harmônica.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a
60 Hz	140 V	100.00%	6,78 A	100.00%	0,294 A	2,22 A
180 Hz	259 mV	0.18%	1,55 A	22.88%	5,49 A	2,56 A
300 Hz	2.9 V	2.07%	4,28 A	63.06%	0,593 A	0,056 A
420 Hz	1.74 V	1.24%	3,11 A	45.82%	0,523 A	0,022 A
540 Hz	1.06 V	0.75%	1,82 A	26.83%	5,22 A	0,028 A
650 Hz	723 mV	0.51%	1,09 A	16.13%	0,842 A	0,08 A
770 Hz	285 mV	0.20%	0,590 A	8.70%	0,282 A	0,0 A
890 Hz	134 mV	0.10%	0,213 A	3.15%	0,520 A	0,0 A
1.02 kHz	347 mV	0.25%	0,110 A	1.62%	0,144 A	0,0 A
1.14 kHz	371 mV	0.26%	0,152 A	2.24%	0,222 A	0,0 A
1.26 kHz	139 mV	0.10%	0,133 A	1.95%	0,371 A	0,0 A
1.38 kHz	133 mV	0.09%	0,067 A	0.99%	0,070 A	0,0 A
1.5 kHz	215 mV	0.15%	0,030 A	0.46%	0,155 A	0,0 A
1.62 kHz	60.7 mV	0.04%	0,06 A	0.87%	0,142 A	0,0 A
1.74 kHz	119 mV	0.08%	0,056 A	0.82%	0,133 A	0,0 A
1.86 kHz	87.8 mV	0.06%	0,04 A	0.61%	0,077 A	0,0 A

Observa-se melhora significativa na qualidade da filtragem da 3ª harmônica por parte do filtro shunt sintonizado de 3ª harmônica. A TDH da tensão eleva-se pouco, alcançando 2,64%. A 5ª e 7ª harmônicas apresentam leve redução. A TDH da corrente de entrada encontra-se em 87,64%.

• **Caso 6:**

Inserir-se no sistema os filtros de bloqueio de fase e de neutro de 3ª harmônica, conjuntamente com os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, obtendo-se os seguintes resultados:

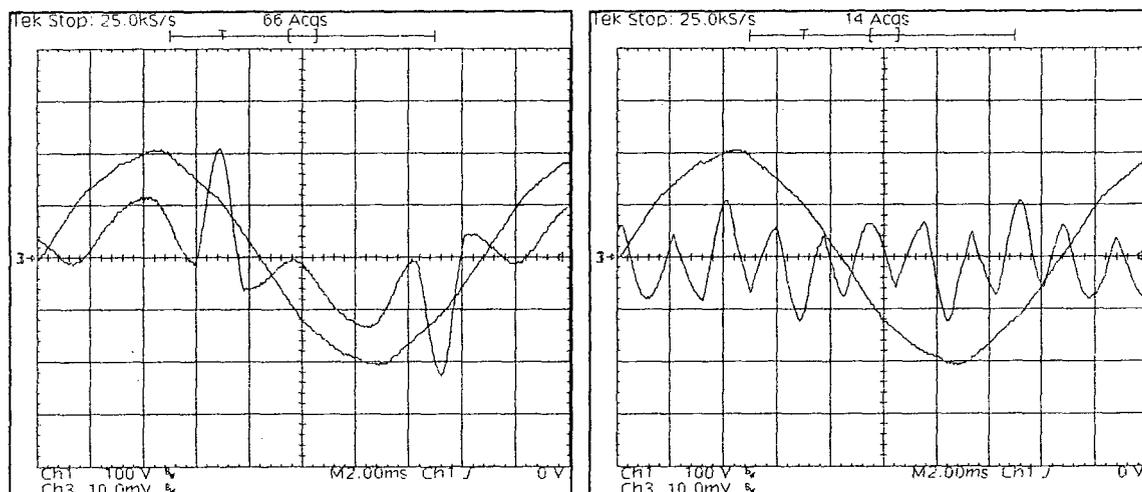


Figura 5.13 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

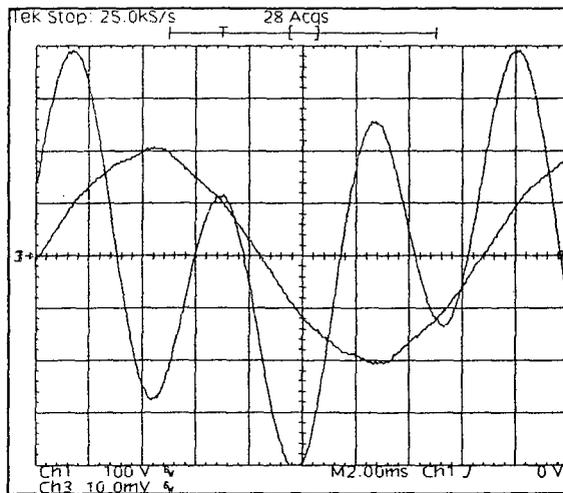


Figura 5.14 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div).

Tabela 5.7 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro de 3ª harmônica.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a
60 Hz	141 V	100.00%	6,78 A	100.00%	0,227 A	2,22 A
180 Hz	301 mV	0.21%	0,217 A	3.19%	2,48 A	3,66 A
300 Hz	2.93 V	2.08%	4,16 A	61.28%	0,463 A	0,062 A
420 Hz	1.76 V	1.25%	3,11 A	45.93%	0,697 A	0,024 A
540 Hz	913 mV	0.65%	1,82 A	26.83%	4,68 A	0,034 A
660 Hz	677 mV	0.48%	1,04 A	15.32%	0,825 A	0,06 A
780 Hz	265 mV	0.19%	0,550 A	8.12%	0,463 A	0,0 A
900 Hz	131 mV	0.09%	0,173 A	2.55%	0,25 A	0,0 A
1.02 kHz	398 mV	0.28%	0,064 A	0.94%	0,2 A	0,0 A
1.14 kHz	331 mV	0.24%	0,112 A	1.65%	0,162 A	0,0 A
1.26 kHz	132 mV	0.09%	0,096 A	1.42%	0,195 A	0,0 A
1.38 kHz	133 mV	0.09%	0,056 A	0.85%	0,02 A	0,0 A
1.5 kHz	148 mV	0.11%	0,055 A	0.81%	0,194 A	0,0 A
1.62 kHz	47.9 mV	0.03%	0,06 A	0.89%	0,155 A	0,0 A
1.74 kHz	101 mV	0.07%	0,06 A	0.91%	0,108 A	0,0 A
1.86 kHz	186 mV	0.13%	0,032 A	0.47%	0,45 A	0,0 A

Observa-se excelente melhora na filtragem da 3ª harmônica do sistema, a qual passa a circular praticamente somente pelo filtro shunt sintonizado de 3ª harmônica. A 5ª e a 7ª harmônicas praticamente não apresentaram variação. A TDH de tensão encontra-se em 2,54% e a TDH da corrente de entrada em 83,14%.

• **Caso 7:**

Inserem-se os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, conjuntamente com o filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica. Os resultados podem ser abaixo observados.

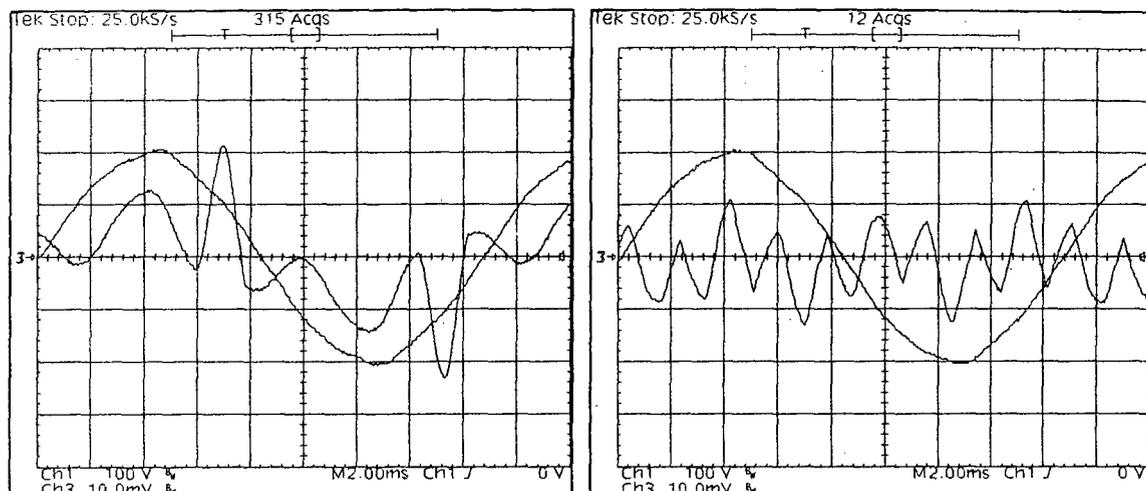


Figura 5.15 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

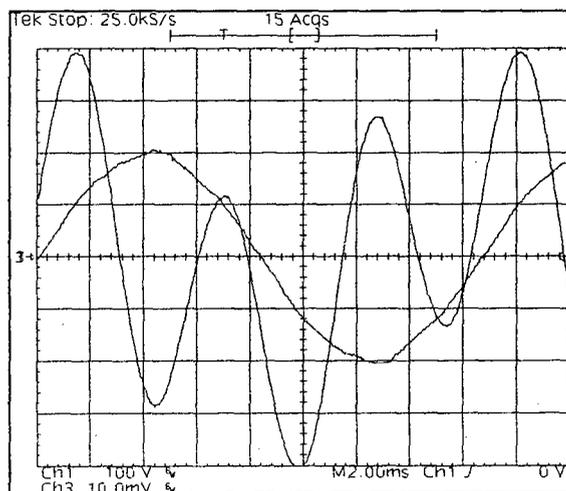


Figura 5.16 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div).

Tabela 5.8 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro de 3ª harmônica.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a
60 Hz	141 V	100.00%	6,65 A	100.00%	0,427 A	2,2 A
180 Hz	467 mV	0.33%	0,276 A	1.09%	2,94 A	3,74 A
300 Hz	2.72 V	1.93%	4,64 A	69.66%	0,528 A	0,084 A
420 Hz	1.59 V	1.13%	3,11 A	46.74%	0,083 A	0,03 A
540 Hz	808 mV	0.57%	1,87 A	28.04%	4,65 A	0,034 A
660 Hz	760 mV	0.54%	1,05 A	15.77%	0,439 A	0,0 A
780 Hz	256 mV	0.18%	0,579 A	8.70%	0,291 A	0,0 A
900 Hz	168 mV	0.12%	0,197 A	2.95%	0,138 A	0,0 A
1.02 kHz	292 mV	0.21%	0,045 A	0.68%	0,113 A	0,0 A
1.14 kHz	506 mV	0.36%	0,096 A	1.45%	0,158 A	0,0 A
1.26 kHz	75.6 mV	0.05%	0,075 A	1.14%	0,186 A	0,0 A
1.38 kHz	241 mV	0.17%	0,042 A	0.63%	0,026 A	0,0 A
1.5 kHz	206 mV	0.15%	0,050 A	0.76%	0,088 A	0,0 A
1.62 kHz	51.3 mV	0.04%	0,096 A	1.44%	0,296 A	0,0 A
1.74 kHz	166 mV	0.12%	0,081 A	1.22%	0,080 A	0,0 A
1.86 kHz	129 mV	0.09%	0,073 A	1.09%	0,048 A	0,0 A

Observa-se bom desempenho do filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica. Sua atuação é mais destacada do que a encontrada utilizando somente o filtro de bloqueio de fase de 3ª harmônica. A TDH da tensão encontra-se na ordem de 2,47% e da corrente de entrada em 90,38%.

• **Caso 8:**

Neste caso foram utilizados os filtros de bloqueio de neutro e de fase de 3ª harmônica, os filtros de bloqueio de fase de 5ª harmônica e os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas. Os resultados encontrados podem ser a seguir observados.

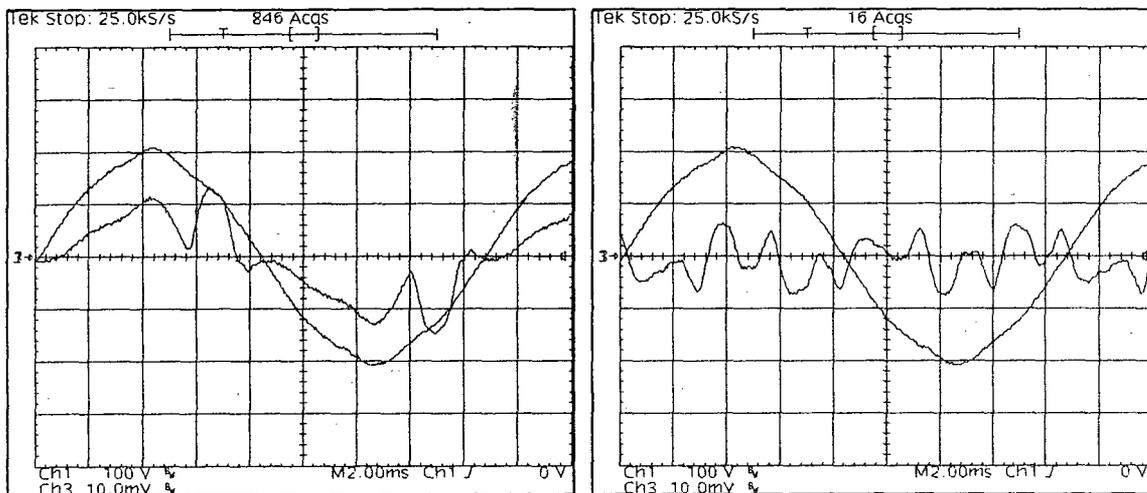
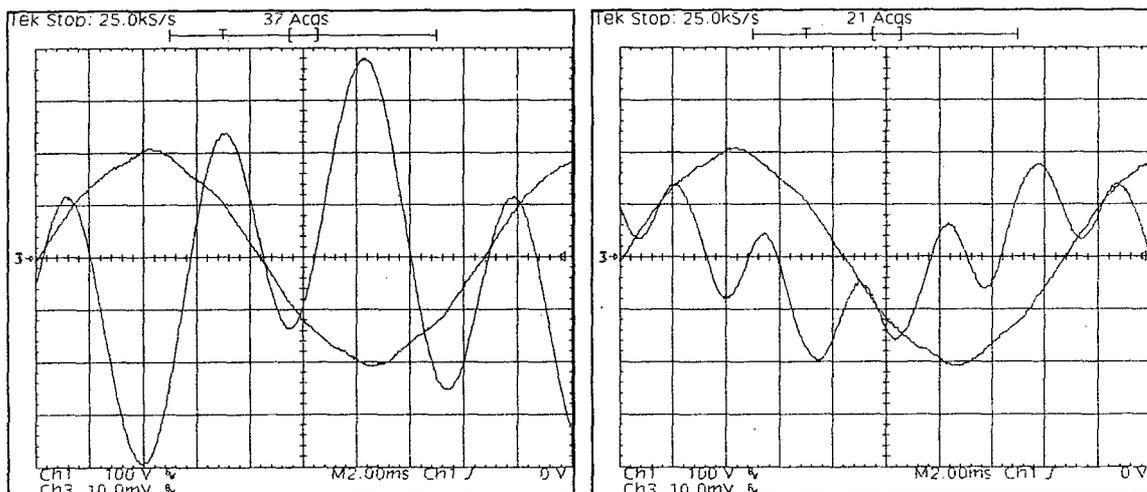


Figura 5.17 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.



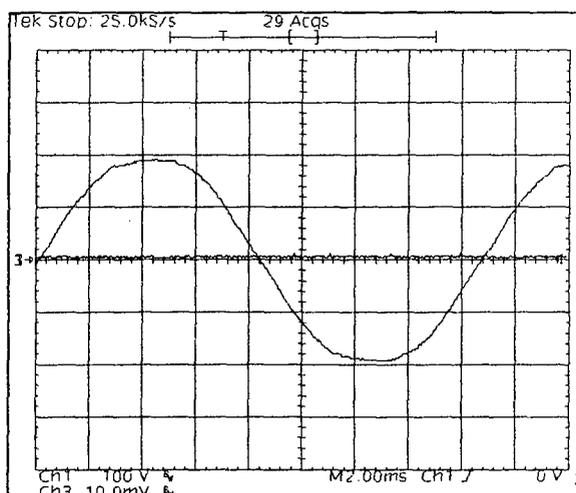


Figura 5.18 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente do filtro shunt de 5ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita; tensão de fase pós-filtros de bloqueio (carga) (100V/div) – abaixo.

Tabela 5.9 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro shunt de 3ª harmônica, corrente do filtro shunt de 5ª harmônica e da tensão na carga.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	I neutro	I shunt 3a	I shunt 5a	V fase *	V fase * %
60 Hz	140 V	100.00%	6,97 A	100.00%	0,399 A	2,24 A	1,64 A	142 V	100.00%
180 Hz	254 mV	0.18%	0,291 A	4.18%	2,27 A	3,5 A	0,256 A	5 V	3.53%
300 Hz	3.19 V	2.28%	1,61 A	23.08%	0,180 A	0,085 A	1,102 A	2.37 V	1.68%
420 Hz	2.44 V	1.74%	2,12 A	30.46%	0,466 A	0,08 A	0,064 A	494 mV	0.35%
540 Hz	799 mV	0.57%	1,08 A	15.55%	2,66 A	0,05 A	0,077 A	831 mV	0.59%
660 Hz	456 mV	0.32%	0,351 A	5.03%	0,647 A	0,0 A	0,0 A	484 mV	0.34%
780 Hz	440 mV	0.31%	0,068 A	0.97%	0,448 A	0,0 A	0,0 A	460 mV	0.33%
900 Hz	208 mV	0.15%	0,227 A	3.26%	0,551 A	0,0 A	0,0 A	292 mV	0.21%
1.02 kHz	224 mV	0.16%	0,257 A	3.69%	0,253 A	0,0 A	0,0 A	158 mV	0.11%
1.14 kHz	217 mV	0.15%	0,223 A	3.20%	0,163 A	0,0 A	0,0 A	105 mV	0.07%
1.26 kHz	206 mV	0.15%	0,159 A	2.27%	0,306 A	0,0 A	0,0 A	145 mV	0.10%
1.38 kHz	203 mV	0.14%	0,093 A	1.34%	0,118 A	0,0 A	0,0 A	271 mV	0.19%
1.5 kHz	180 mV	0.13%	0,01 A	0.15%	0,146 A	0,0 A	0,0 A	60.5 mV	0.04%
1.62 kHz	119 mV	0.08%	0,051 A	0.73%	0,103 A	0,0 A	0,0 A	147 mV	0.10%
1.74 kHz	96.2 mV	0.07%	0,072 A	1.03%	0,052 A	0,0 A	0,0 A	156 mV	0.11%
1.86 kHz	110 mV	0.08%	0,060 A	0.87%	0,105 A	0,0 A	0,0 A	103 mV	0.07%

A TDH da corrente já apresenta significativa melhora, registrando 42,31%. A TDH da tensão antes dos filtros de bloqueio encontra-se em 2,99% e após os filtros de bloqueio em 4,02%. Observa-se expressiva melhora na filtragem da 5ª harmônica ao inserir-se os filtros de bloqueio paralelos de fase de 5ª harmônica.

• **Caso 9:**

Por fim insere-se conjuntamente com os filtros shunt sintonizados de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas, os filtros de bloqueio paralelos de 3ª, 5ª e 7ª harmônicas e o filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica, apresentando desta forma a máxima capacidade de filtragem da bancada de testes apresentada. Os resultados podem ser a seguir observados.

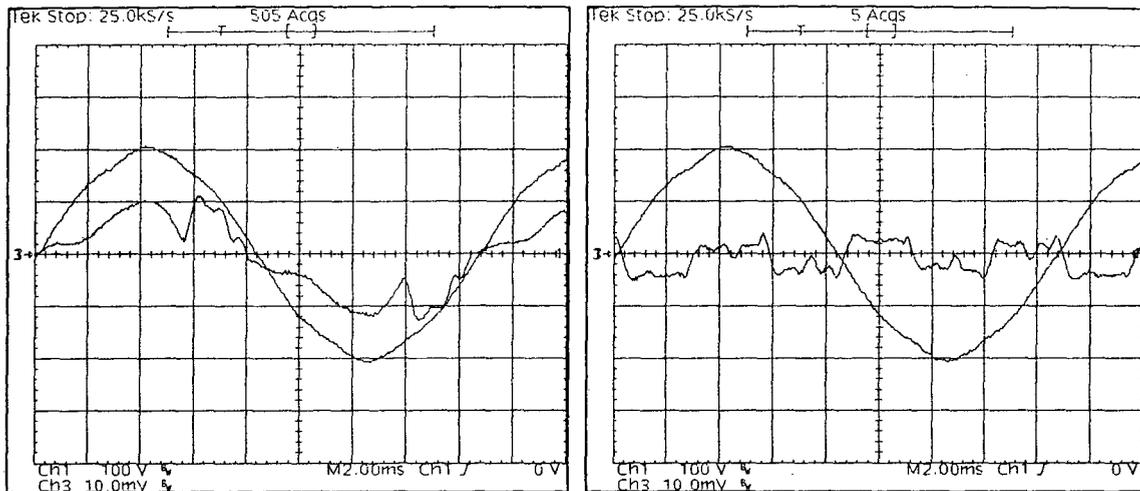


Figura 5.19 – Corrente de fase (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente de neutro (10A/div) e tensão de fase (100V/div) – direita.

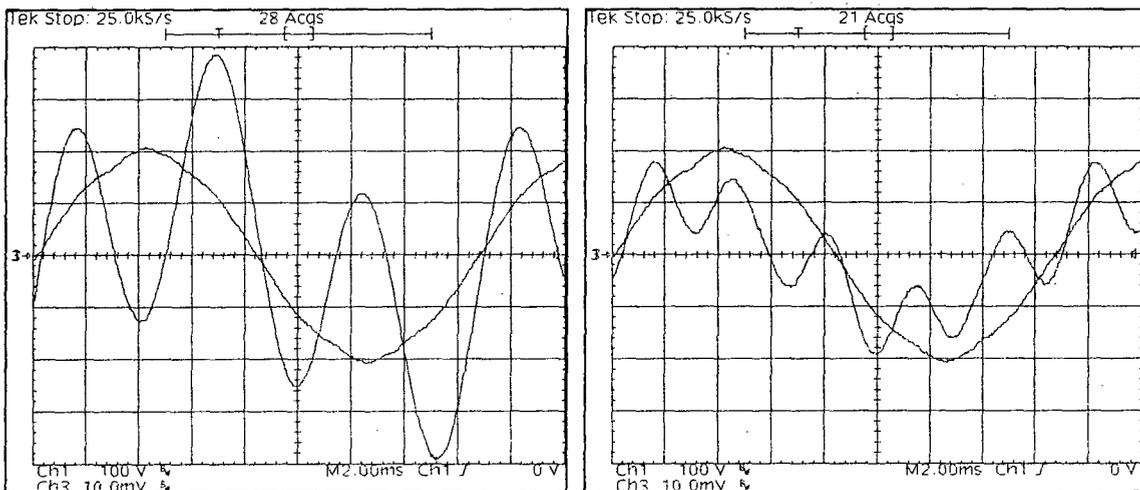


Figura 5.20 – Corrente do filtro shunt de 3ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; corrente do filtro shunt de 5ª harmônica (2A/div) – direita.

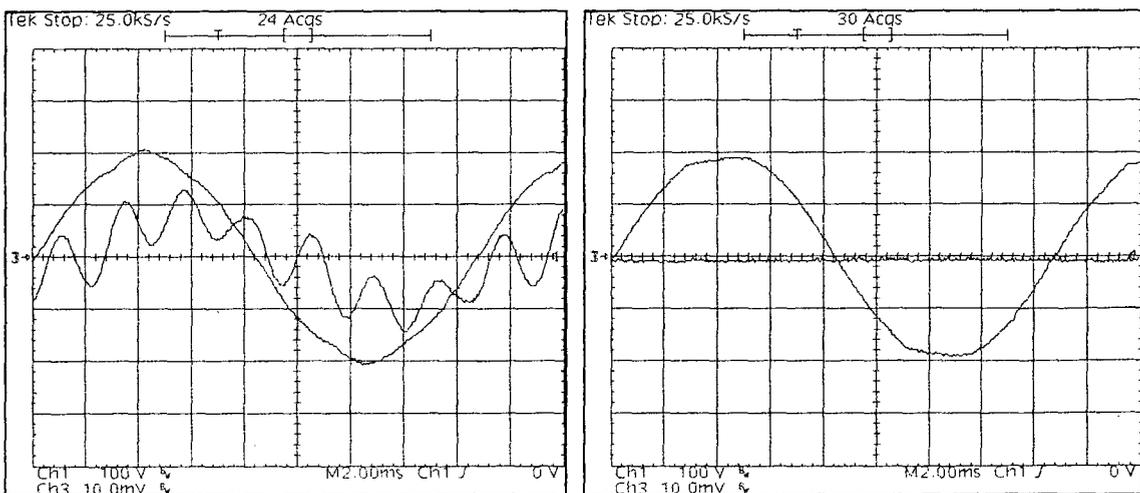


Figura 5.21 – Corrente do filtro shunt de 7ª harmônica (2A/div) e tensão de fase (100V/div) – esquerda; tensão de fase pós-filtros de bloqueio (carga) (100V/div) – direita.

Tabela 5.10 – Espectro harmônico da tensão de fase, corrente de fase, corrente de neutro, corrente do filtro shunt de 3ª harmônica, corrente do filtro shunt de 5ª harmônica, corrente do filtro shunt de 7ª harmônica e da tensão na carga.

Freq	V fase	V fase %	I fase	I fase %	Ineutro	I shunt 3a.	I shunt 5a	I shunt 7a.	V fase *	V fase * %
60 Hz	141 V	100.00%	6,95 A	100.00%	0,463 A	2,22 A	1,638 A	1,196 A	140 V	100.00%
180 Hz	551 mV	0.39%	0,383 A	5.50%	2,12 A	3,50 A	0,228 A	0,143 A	4.94 V	3.52%
300 Hz	3.06 V	2.17%	1,54 A	22.17%	0,285 A	0,061 A	1,03 A	0,130 A	1.47 V	1.05%
420 Hz	2.01 V	1.43%	0,695 A	10.00%	0,365 A	0,034 A	0,126 A	0,7 A	1.17 V	0.83%
540 Hz	117 mV	0.08%	0,564 A	8.11%	1,08 A	0,020 A	0,044 A	0,107 A	711 mV	0.51%
660 Hz	582 mV	0.41%	0,319 A	4.59%	0,249 A	0,0 A	0,015 A	0,027 A	403 mV	0.29%
780 Hz	366 mV	0.26%	0,285 A	4.10%	0,187 A	0,0 A	0,015 A	0,020 A	505 mV	0.36%
900 Hz	152 mV	0.11%	0,230 A	3.31%	0,383 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	160 mV	0.11%
1.02 kHz	25.5 mV	0.02%	0,277 A	3.98%	0,126 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	196 mV	0.14%
1.14 kHz	506 mV	0.36%	0,338 A	4.86%	0,335 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	291 mV	0.21%
1.26 kHz	136 mV	0.10%	0,225 A	3.67%	0,446 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	240 mV	0.17%
1.38 kHz	150 mV	0.11%	0,01 A	1.40%	0,113 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	95 mV	0.07%
1.5 kHz	177 mV	0.13%	0,078 A	1.13%	0,146 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	183 mV	0.13%
1.62 kHz	22.8 mV	0.02%	0,128 A	1.84%	0,197 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	124 mV	0.09%
1.74 kHz	141 mV	0.10%	0,108 A	1.56%	0,109 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	165 mV	0.12%
1.86 kHz	141 mV	0.10%	0,05 A	0.74%	0,069 A	0,0 A	0,0 A	0,0 A	176 mV	0.13%

A TDH da corrente de entrada encontra-se em 28,28%, apresentando desta forma o melhor resultado entre todos os casos estudados. A TDH da tensão na carga encontra-se na ordem de 3,85% e na entrada do sistema em 2,73%. A queda de tensão existente entre a entrada (transformador) e a carga encontra-se baixa, mesmo com a inserção dos três filtros de bloqueio na fase.

5.4 – Comentários sobre os Resultados Obtidos

Após realizados os ensaios na bancada de testes utilizando todos os filtros shunt sintonizados e de bloqueio paralelos de fase e de neutro é possível apresentar algumas conclusões importantes a partir dos dados obtidos (observar gráficos a seguir).

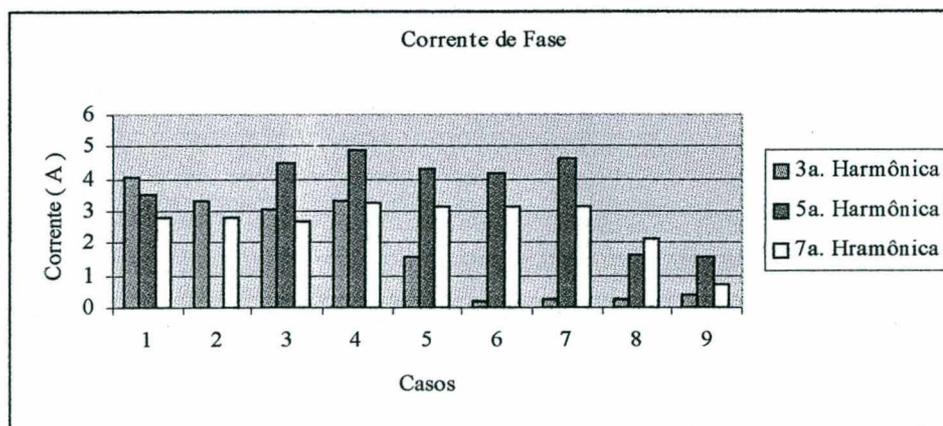


Figura 5.22 – Gráfico evolutivo das harmônicas da corrente de fase em relação ao casos estudados.

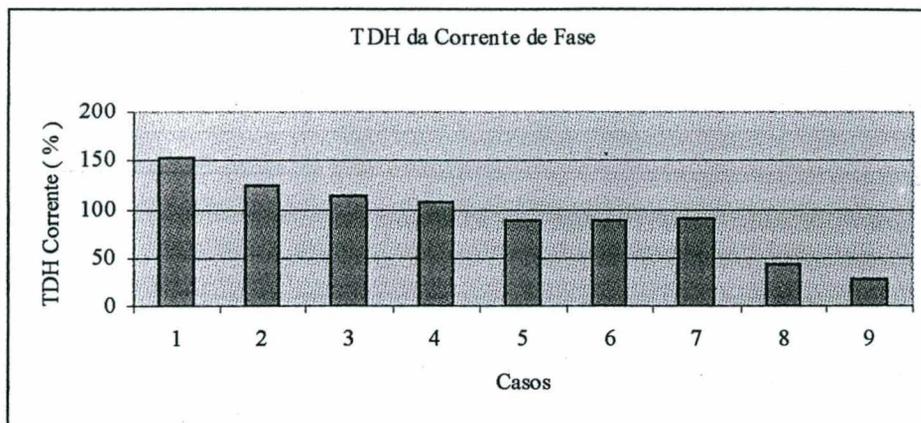


Figura 5.23 – Gráfico evolutivo da TDH da corrente de fase em relação ao casos estudados.

- ✓ Observa-se grande vantagem no uso dos filtros de bloqueio junto a filtragem propiciada pelos filtros shunt sintonizados, uma vez que a TDH da corrente de entrada no caso 4 (106,65%) foi amplamente reduzida no caso 9 (28,28 %), com o uso dos filtros de bloqueio no auxílio aos filtros shunt sintonizados.
- ✓ Verifica-se ao comparar-se os resultados dos casos 1 e 4, que as correntes de 5^a e 7^a harmônicas encontram-se com amplitudes maiores na entrada do sistema, do que o obtido somente na carga. Este fato deve-se ao fato das harmônicas do próprio sistema estarem penetrando na bancada, devido a atuação dos filtros no sistema. Esta constatação propicia concluir que os resultados finais obtidos podem estar apresentando valores significativamente melhores do que o obtido no caso 9, pois o conteúdo de 5^a e 7^a harmônicas ainda verificados podem ser provenientes da rede de alimentação e não da própria carga utilizada.
- ✓ A sensível melhora obtida na filtragem da 3^a harmônica com o uso dos filtros de bloqueio paralelos de neutro e de fase conjuntamente, pode ocasionar a muitos casos a completa eliminação desta harmônica, a qual é a de maior dificuldade de filtragem, por possuir a maior amplitude e estar muito próxima da fundamental. Cabe ainda ressaltar que a mesma ainda é a grande responsável por grande parte da TDH de tensão em sistemas e a que apresenta grande poder de penetração em sistemas de distribuição.
- ✓ A TDH da tensão obtida na carga com o uso de todos os filtros (caso 9) encontra-se de acordo com as normas, evidenciando ainda que a TDH da tensão no barramento de alimentação (secundário do transformador) apresenta-se ainda melhor, fato este que poderia propiciar a conexão de quaisquer outras cargas sem prejuízo algum na qualidade da energia fornecida.

Os filtros de bloqueio portanto apresentam excelente resposta em termos de auxílio a filtragem tradicional de harmônicos feita pelos filtros shunt sintonizados, apresentando baixa degradação na tensão da carga e expressiva melhora na TDH da corrente de entrada.

CONCLUSÃO GERAL

Neste trabalho foram propostas novas estruturas de auxílio à filtragem tradicional de harmônicos, utilização de filtros shunt sintonizados, denominados filtros de bloqueio. Os filtros de bloqueio podem ser classificados como filtros de bloqueio paralelo, de fase e de neutro, e filtros de bloqueio série.

No início do estudo foi verificado o comportamento dos elementos do filtro shunt sintonizado e como estes afetam sua resposta em frequência. Concluiu-se que quanto maior o valor da capacitância utilizada para um mesmo filtro, maior sua banda de frequência em que sua impedância apresenta baixos valores e menor a amplificação harmônica possível no caso da perda de sintonia de filtros de um sistema. Neste caso sistemas que possuem elevado fator de deslocamento, associado à baixa potência podem apresentar sérias dificuldades de filtragem passiva com o uso exclusivo de filtros shunt sintonizados. A perda da sintonia com a variação de valores dos elementos pode ocasionar neste caso a total inutilidade dos filtros.

Em seguida foi analisada a estrutura básica de carga de uma instalação comercial, a qual caracteriza-se pela presença de elementos que apresentam em sua entrada um retificador monofásico com filtro capacitivo (RMFC). Foi apresentada sua composição básica, observando-se como a corrente de entrada variava em função de seus parâmetros. Este processo levou a conclusão que os valores desta estrutura podem ser variados de modo a obter-se correntes harmônicas proporcionais às encontradas nas instalações comerciais de baixa tensão. Os valores da resistência de carga e da indutância de dispersão são os principais parâmetros a serem variados ao tentar-se, com um RMFC, modelar em ambiente computacional uma instalação comercial de baixa tensão.

Foram apresentados em seguida todos os modelos de filtros de bloqueio propostos, com seus elementos constituintes, suas respostas em frequência frente a variações de parâmetros e demais informações. Pôde-se observar portanto que com pequenos valores de indutância, associados a baixas quedas de tensão, era possível criar com os filtros de bloqueio elevados valores de impedância na frequência de ressonância do filtro.

Após apresentados todos os aspectos de funcionamento dos filtros de bloqueio tratou-se de verificar via simulação numérica, a sua potencialidade de uso. Foram desenvolvidas simulações em sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados, sendo utilizadas cargas monofásicas do tipo RMFC. Destaca-se a grande importância aos filtros de bloqueio paralelos de fase e de neutro, obtendo excelentes resultados, tais como grande aumento na filtragem harmônica dos filtros shunt ao implementar-se os filtros de bloqueio paralelos de fase e de neutro de 3^a harmônica, conjuntamente com filtros de bloqueio paralelos de fase de 5^a e 7^a harmônicas. As simulações mostraram ainda que sua utilização no sistema do prédio do INEP (Instituto de Eletrônica de Potência) acarretaria sensível melhora na filtragem tradicional a ser projetada.

Por último foi implementada uma bancada de testes para observar na prática os resultados do uso de filtros de bloqueio paralelos de fase e de neutro, sendo utilizados RMFC em cada uma das fases. Os resultados obtidos comprovam a excepcional vantagem no uso destes filtros, principalmente dos filtros de bloqueio paralelos de fase e de neutro de 3ª harmônica, os quais praticamente anularam a 3ª harmônica na fase do sistema, a qual é a harmônica mais difícil a ser filtrada. Cabe destacar que não houve grandes problemas na parte de distorção harmônica da tensão pós-filtros, com pequena elevação da TDH da tensão. A filtragem das correntes de 5ª e 7ª harmônicas também apresentaram significativos resultados frente ao uso dos filtros de bloqueio, porém cabe destacar que as próprias harmônicas do sistema, as quais penetraram através do transformador para os filtros shunt sintonizados, trataram de mascarar os resultados obtidos para estas harmônicas. Mesmo com este problema evidencia-se que os filtros de bloqueio paralelos de fase de 5ª e 7ª harmônicas atuam significativamente bem no auxílio aos filtros shunt sintonizados. Indica-se que inicialmente o filtro de bloqueio de neutro de 3ª harmônica seja implementado em uma instalação elétrica onde existam filtros shunt sintonizados de 3ª harmônica, para a averiguação em maior escala de sua excepcional potencialidade.

Ao final deste trabalho destaca-se que o objetivo inicial foi amplamente alcançado, abrindo novas fronteiras para novos e múltiplos estudos na parte de filtragem passiva de harmônicos. Novas concepções na área de projeto e maximização da potencialidade destes filtros devem ser buscadas, as quais podem resultar em uma nova etapa para esta área da eletrônica de potência.

UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina
INEP - Instituto de Eletrônica de Potência

ANEXO I - Projeto de Filtros Shunt Sintonizados
Autor: Marco Aurélio Quadros

Primeiro Passo: Determinar os dados do transformador e sua modelagem

Determina-se a variação da frequência a ser analisada do sistema:

$f := 1,2..2000$ (exemplo)

$w(f) := 2 \cdot \pi \cdot f$

Inserir-se os valores obtidos dos dados de placa do transformador:

$R_s := 50 \cdot 10^{-3} \text{ [}\Omega\text{]}$ (exemplo) $L_s := 50 \cdot 10^{-6} \text{ [H]}$ (exemplo)

Define-se a equação da impedância do transformador em função da frequência

$Z_{trafo}(f) := R_s + i \cdot w(f) \cdot L_s$ (função complexa)

$Z_{trafomod}(f) := |Z_{trafo}(f)|$ (módulo da função complexa)

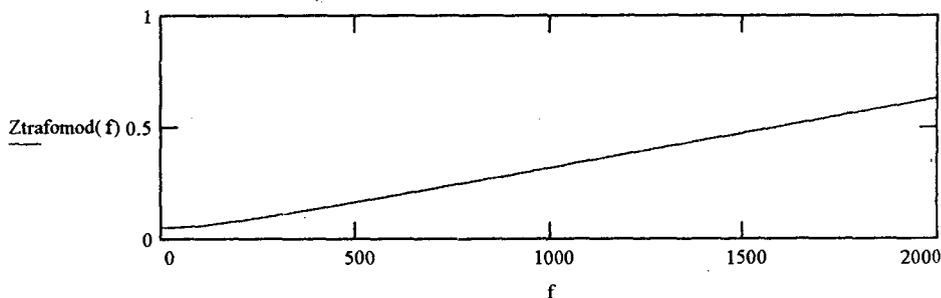
Determina-se alguns pontos de interesse:

$Z_{trafomod}(60) = 0.053 \text{ [}\Omega\text{]}$ $Z_{trafomod}(420) = 0.141 \text{ [}\Omega\text{]}$ $Z_{trafomod}(780) = 0.25 \text{ [}\Omega\text{]}$

$Z_{trafomod}(300) = 0.107 \text{ [}\Omega\text{]}$ $Z_{trafomod}(660) = 0.213 \text{ [}\Omega\text{]}$

(exemplos)

Plota-se a resposta obtida da impedância do transformador em função da frequência



(exemplo)

Segundo Passo: Projeto do primeiro filtro shunt sintonizado

Determina-se a frequência de ressonância do filtro e o valor de capacitância a ser utilizado

$$f_{o1} := 180 \quad [\text{Hz}] \quad (\text{exemplo})$$

$$C_{shunt1} := 105 \cdot 10^{-6} \quad [\text{F}] \quad (\text{exemplo})$$

$$\omega_{o1} := 2 \cdot \pi \cdot f_{o1}$$

Calcula-se o valor da capacitância do filtro

$$L_{shunt1} := \frac{1}{\omega_{o1}^2 \cdot C_{shunt1}} \quad L_{shunt1} = 7.44571 \cdot 10^{-3} \quad (\text{exemplo})$$

Com o valor da indutância e da corrente de pico desta harmônica determina-se através do ANEXO 2 o valor da resistência do enrolamento do indutor, que será considerado o valor a ser utilizado no projeto da resistência do filtro shunt sintonizado.

$$R_{shunt1} := 96.27 \cdot 10^{-3} \quad [\Omega] \quad (\text{exemplo})$$

Pode-se então determinar o fator de qualidade do filtro

$$Q_{shunt1} := \frac{L_{shunt1} \cdot \omega_{o1}}{R_{shunt1}} \quad Q_{shunt1} = 87.472 \quad (\text{exemplo})$$

Determina-se a equação da impedância do filtro em função da frequência e seu módulo

$$Z_{filtro1}(f) := R_{shunt1} + i \cdot \omega(f) \cdot L_{shunt1} + \frac{1}{i \cdot \omega(f) \cdot C_{shunt1}}$$

$$Z_{filtro1mod}(f) := |Z_{filtro1}(f)|$$

Observa-se alguns valores encontrados

$$Z_{filtro1mod}(60) = 22.46 \quad [\Omega] \quad Z_{filtro1mod}(300) = 8.98 \quad [\Omega] \quad Z_{filtro1mod}(660) = 28.58 \quad [\Omega]$$

$$Z_{filtro1mod}(180) = 0.096 \quad [\Omega] \quad Z_{filtro1mod}(420) = 16.04 \quad [\Omega] \quad Z_{filtro1mod}(780) = 34.55 \quad [\Omega]$$

(exemplos)

Com o valor encontrado para a impedância do filtro na frequência fundamental determina-se qual é o valor da capacitância do filtro nesta frequência

$$V_{eficaz} := 220 \quad [\text{V}] \quad (\text{tensão eficaz do sistema - exemplo})$$

$$I_{60shunt1} := \frac{V_{eficaz}}{\left| i \cdot \omega(60) \cdot L_{shunt1} + \frac{1}{i \cdot \omega(60) \cdot C_{shunt1}} \right|}$$

$$Q_{Lshunt1} := I_{60shunt1}^2 \cdot \omega(60) \cdot L_{shunt1}$$

$$Q_{Cshunt1} := \frac{I_{60shunt1}^2}{\omega(60) \cdot C_{shunt1}}$$

$$Q_{filtro60_1} := Q_{Cshunt1} - Q_{Lshunt1} \quad Q_{filtro60_1} = 2.155 \cdot 10^3 \text{ [KVar]} \quad (\text{exemplo})$$

$$C_{60equivalente1} := \frac{Q_{filtro60_1}}{V_{eficaz}^2 \cdot \omega(60)} \quad C_{60equivalente1} = 1.181 \cdot 10^{-4} \text{ [F]} \quad (\text{exemplo})$$

Encontra-se então a banda de excursão da frequência de ressonância onde a impedância do filtro é menor que a do transformador

$$b1 := (R_{shunt1}^2 \cdot C_{shunt1}^2 - 2 \cdot C_{shunt1} \cdot L_{shunt1} - Z_{trafomod}(f_0)^2 \cdot C_{shunt1}^2)$$

$$a1 := (L_{shunt1}^2 \cdot C_{shunt1}^2)$$

$$c1 := 1$$

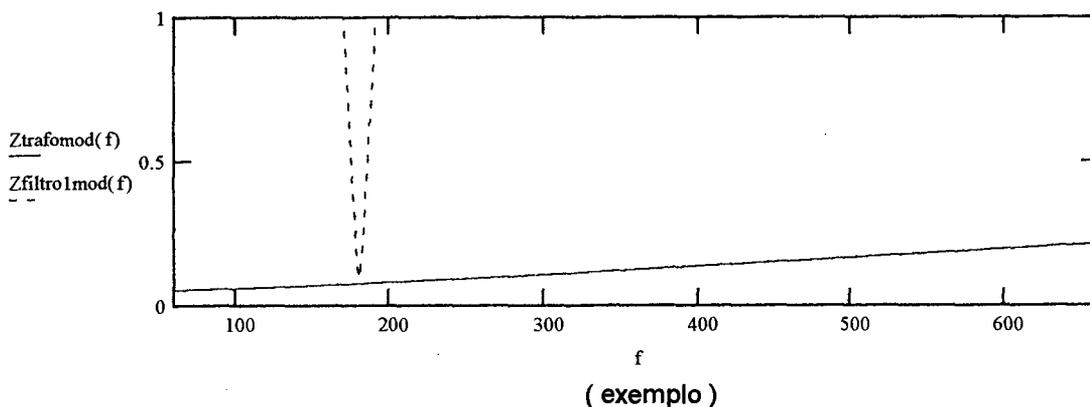
$$\Delta 1 := (b1^2 - 4 \cdot a1 \cdot c1)$$

$$s_{max1} := \frac{-b1 + \sqrt{\Delta 1}}{2 \cdot a1} \quad \omega_{max1} := \sqrt{s_{max1}} \quad f_{max1} := \frac{\omega_{max1}}{2 \cdot \pi} \quad f_{max1} = 179.999 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo})$$

$$s_{min1} := \frac{-b1 - \sqrt{\Delta 1}}{2 \cdot a1} \quad \omega_{min1} := \sqrt{s_{min1}} \quad f_{min1} := \frac{\omega_{min1}}{2 \cdot \pi} \quad f_{min1} = 179.999 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo})$$

$$\Delta f1 := f_{max1} - f_{min1} \quad \Delta f1 = 1.277i \quad [\text{Hz}] \quad (\text{exemplo})$$

A análise gráfica da impedância do filtro e do transformador em função da frequência pode então ser observada



Terceiro Passo: Projeto do Filtro de Frequência Superior

Os passos de projeto para o próximo filtro devem ser os mesmos do primeiro filtro

Determina-se a frequência de ressonância do filtro e o valor de capacitância a ser utilizado

$$f_{o2} := 300 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo}) \quad C_{shunt2} := 107.4 \cdot 10^{-6} \text{ [F]} \quad (\text{exemplo})$$

$$\omega_{o2} := 2 \cdot \pi \cdot f_{o2}$$

Calcula-se o valor da capacitância do filtro

$$L_{shunt2} := \frac{1}{\omega_{o2}^2 \cdot C_{shunt2}} \quad L_{shunt2} = 2.62056 \cdot 10^{-3} \text{ [H]} \quad (\text{exemplo})$$

Com o valor da indutância e da corrente de pico desta harmônica determina-se através do ANEXO 2 o valor da resistência do enrolamento do indutor, que será considerado o valor a ser utilizado no projeto da resistência do filtro shunt sintonizado.

$$R_{shunt2} := 98.79 \cdot 10^{-3} \text{ [\Omega]} \quad (\text{exemplo})$$

Pode-se então determinar o fator de qualidade do filtro

$$Q_{shunt2} := \frac{L_{shunt2} \cdot \omega_{o2}}{R_{shunt2}} \quad Q_{shunt2} = 50.001 \quad (\text{exemplo})$$

Determina-se a equação da impedância do filtro em função da frequência e seu módulo

$$Z_{filtro2}(f) := R_{shunt2} + i \cdot \omega(f) \cdot L_{shunt2} + \frac{1}{i \cdot \omega(f) \cdot C_{shunt2}}$$

$$Z_{filtro2mod}(f) := |Z_{filtro2}(f)|$$

Observa-se alguns valores encontrados

$$Z_{filtro2mod}(60) = 23.71 \text{ [\Omega]} \quad Z_{filtro2mod}(300) = 0.099 \text{ [\Omega]} \quad Z_{filtro2mod}(660) = 8.622 \text{ [\Omega]}$$

$$Z_{filtro2mod}(180) = 5.27 \text{ [\Omega]} \quad Z_{filtro2mod}(420) = 3.389 \text{ [\Omega]} \quad Z_{filtro2mod}(780) = 10.944 \text{ [\Omega]}$$

(exemplos)

Com o valor encontrado para a impedância do filtro na frequência fundamental determina-se qual é o valor da capacitância que o sistema " observa " no filtro

$$I_{60shunt2} := \frac{V_{eficaz}}{\left| i \cdot \omega(60) \cdot L_{shunt2} + \frac{1}{i \cdot \omega(60) \cdot C_{shunt2}} \right|}$$

$$Q_{Lshunt2} := \frac{I_{60shunt2}^2 \cdot \omega(60) \cdot L_{shunt2}}{I_{60shunt2}^2}$$

$$QCshunt2 := \frac{w(60) \cdot Cshunt2}{w(60) \cdot Cshunt2}$$

$$Qfiltro60_2 := QCshunt2 - QLshunt2$$

$$Qfiltro60_2 = 2.041 \cdot 10^3 \text{ [kVar]} \quad (\text{exemplo})$$

$$C60equivalente2 := \frac{Qfiltro60_2}{Veficaz^2 \cdot w(60)}$$

$$C60equivalente2 = 1.119 \cdot 10^{-4} \text{ [F]} \quad (\text{exemplo})$$

Encontra-se então a banda de excursão da frequência de ressonância onde a impedância do filtro é menor que a do transformador

$$b2 := (Rshunt2^2 \cdot Cshunt2^2 - 2 \cdot Cshunt2 \cdot Lshunt2 - Ztrafomod(fo2)^2 \cdot Cshunt2^2)$$

$$a2 := (Lshunt2^2 \cdot Cshunt2^2)$$

$$c2 := 1$$

$$\Delta 2 := (b2^2 - 4 \cdot a2 \cdot c2)$$

$$smax2 := \frac{-b2 + \sqrt{\Delta 2}}{2 \cdot a2}$$

$$wmax2 := \sqrt{smax2}$$

$$fmax2 := \frac{wmax2}{2 \cdot \pi}$$

$$fmax2 = 301.226 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo})$$

$$smin2 := \frac{-b2 - \sqrt{\Delta 2}}{2 \cdot a2}$$

$$wmin2 := \sqrt{smin2}$$

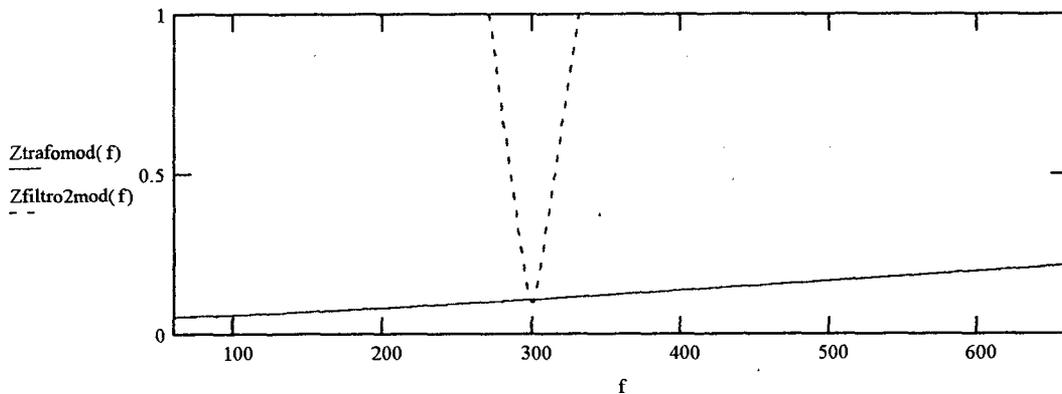
$$fmin2 := \frac{wmin2}{2 \cdot \pi}$$

$$fmin2 = 298.779 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo})$$

$$\Delta f2 := fmax2 - fmin2$$

$$\Delta f2 = 2.447 \text{ [Hz]} \quad (\text{exemplo})$$

A análise gráfica da impedância do filtro e do transformador em função da frequência pode então ser observada



(exemplo)

Quinto Passo: Determinação do Comportamento dos Filtros Superpostos

Após o equacionamento dos dois filtros deve-se observar o comportamento dos mesmos superpostos, para garantir que as características de filtragem não tenham sido afetadas

A impedância superposta fica assim definida

$$Zfiltro12(f) := \frac{Zfiltro1(f) \cdot Zfiltro2(f)}{Zfiltro1(f) + Zfiltro2(f)}$$

$$Z_{\text{filtro12mod}}(f) := |Z_{\text{filtro12}}(f)|$$

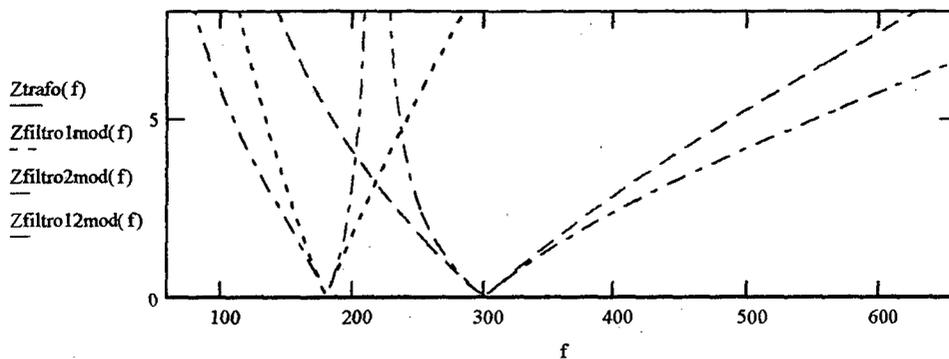
Apresenta-se alguns valores obtidos

$$Z_{\text{filtro12mod}}(60) = 11.533 \text{ [}\Omega\text{]} \quad Z_{\text{filtro12mod}}(300) = 0.099 \text{ [}\Omega\text{]} \quad Z_{\text{filtro12mod}}(420) = 2.798 \text{ [}\Omega\text{]}$$

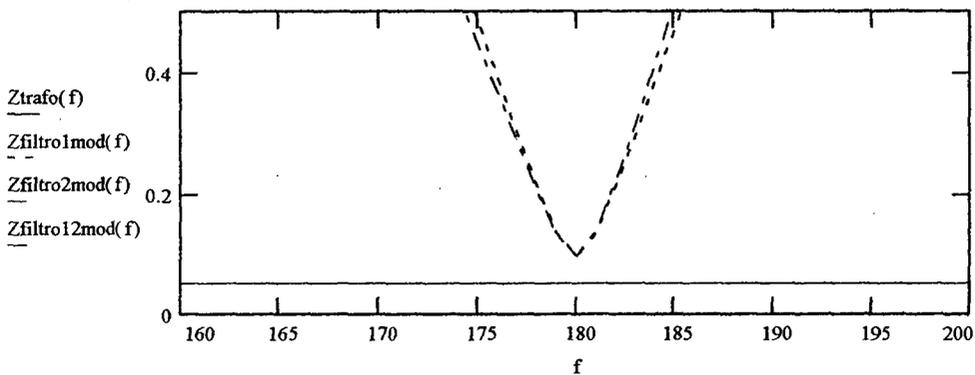
$$Z_{\text{filtro12mod}}(180) = 0.096 \text{ [}\Omega\text{]} \quad Z_{\text{filtro12mod}}(360) = 1.586 \text{ [}\Omega\text{]} \quad Z_{\text{filtro12mod}}(660) = 6.624 \text{ [}\Omega\text{]}$$

(exemplos)

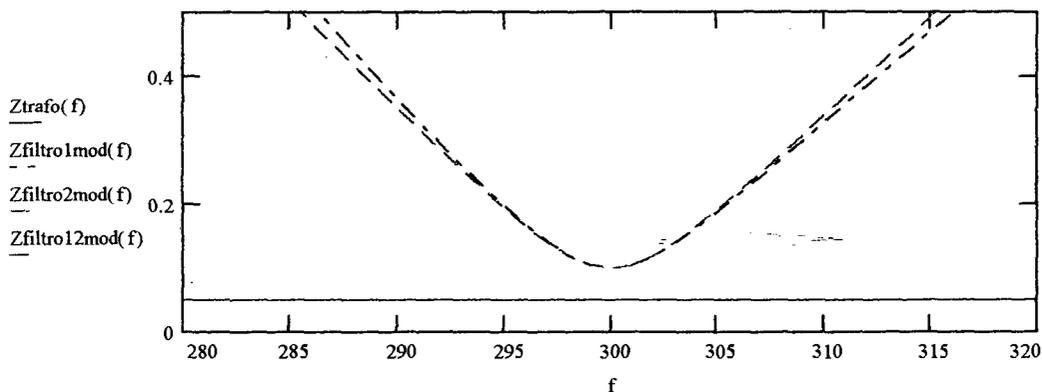
Cabe portanto observar graficamente as respostas dos filtros individualmente e dos filtros superpostos



(exemplo)



(exemplo)



(exemplo)

$$\text{NumAWG12} := \frac{S}{\text{AciAWG12}} \quad \text{NumAWG12} = 0.965$$

$$\text{NumAWG12} := 1$$

$$\text{CtotBob} := \text{Cmediobo} \cdot N \quad \text{CtotBob} = 8.122 \cdot 10^3 \quad [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{ResistAWG12} := 0.000070 \quad [\text{ohms/cm}] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{ResisTotBob} := \text{ResistAWG12} \cdot \text{CtotBob} \quad \text{ResisTotBob} = 0.569$$

$$\text{ResistBobEquiv} := \frac{\text{ResisTotBob}}{\text{NumAWG12}} \quad \text{ResistBobEquiv} = 0.56854 \quad [\Omega] \quad (\text{exemplo})$$

12. Recalcula-se a área de janela, utilizando os valores adotados acima:

$$\frac{S_j}{100} = 38.71 \quad [\text{cm}^2] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{NumCondTotAWG12} := N \cdot \text{NumAWG12} \quad \text{NumCondTotAWG12} = 287 \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{AreaNumCondTotAWG12} := \text{NumCondTotAWG12} \cdot \frac{\text{AciAWG12}}{100}$$

$$\text{AreaNumCondTotAWG12} = 10.708 \quad [\text{cm}^2] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{OcupJanela} := \frac{\text{AreaNumCondTotAWG12}}{\left(\frac{S_j}{100}\right)} \quad \text{OcupJanela} = 0.277 \quad (\text{exemplo})$$

13. Calcula-se o Peso Total do Enrolamento:

$$\text{PesoBobTot} := N \cdot \text{Cmediobo} \cdot \text{NumAWG12} \cdot \frac{0.468}{1000} \quad \text{PesoBobTot} = 3.801 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{exemplo})$$

Peso Total:

$$\text{Ptot} := \text{Pesoferro} + \text{PesoBobTot} \quad \text{Ptot} = 13.476 \quad [\text{Kg}] \quad (\text{exemplo})$$

Quinto Passo: Parâmetros Finais Obtidos no Projeto do Filtro

$$L = 0.0092 \quad [\text{H}] \quad (\text{exemplo})$$

$$C_f = 3.06 \cdot 10^{-5} \quad [\text{F}] \quad (\text{exemplo})$$

$$R_f := \text{ResistBobEquiv} \quad R_f = 0.569 \quad [\Omega] \quad (\text{exemplo})$$

$$Q_f := \frac{w_{ff} \cdot L}{R_f} \quad Q_f = 30.494$$

6. Cálculo da Área de Cobre:

$$S_{cu} := N \cdot S \quad S_{cu} = 1.033 \cdot (\text{exemplo})$$

$$S_j := \left(\frac{a}{2}\right) \cdot (3 \cdot a) \quad S_j = 38.71 [\text{cm}^2] \quad (\text{exemplo})$$

$$S_j := S_j \cdot 100 \quad S_j = 3.871 \cdot 10^3 [\text{mm}^2] \quad (\text{exemplo})$$

7. Determina-se a possibilidade de execução:

$$PE := \frac{S_j}{S_{cu}} \quad PE = 3.747 \quad (\text{exemplo})$$

OBS: Caso a possibilidade de execução seja menor do que 3 deve-se aumentar o valor de "a". Isto acarretará uma mudança no número de espiras.

8. Calcula-se o peso e volume do ferro:

$$V_{\text{ferro}} := 9 \cdot a^2 \cdot b$$

$$V_{\text{ferro}} = 1.18 \cdot 10^3 \quad [\text{cm}^3] \quad (\text{exemplo})$$

$$V_{\text{ferro}}^{\frac{1}{3}} = 10.567 \quad [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

$$V_{\text{ferro}3} := V_{\text{ferro}} \cdot 10^{-6}$$

$$V_{\text{ferro}3} = 0.00118 \quad [\text{m}^3] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{Peso}_{\text{ferro}} := 8.2 \cdot V_{\text{ferro}} \cdot 10^{-3} \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{Peso}_{\text{ferro}} = 9.675 \quad [\text{kg}] \quad (\text{exemplo})$$

9. Cálculo da espessura do entreferro:

$$L_f := 5.6 \cdot a \quad L_f = 28.448$$

$$N_{\text{Im}} := N \cdot I \cdot \sqrt{2} \quad N_{\text{Im}} = 4.333 \cdot 10^3$$

$$A_{ef} := 5.6 \cdot L_f \quad A_{ef} = 159.309$$

$$A_{eE} := N_{\text{Im}} - A_{ef} \quad A_{eE} = 4.174 \cdot 10^3$$

$$L_e := \frac{A_{eE}}{0.8 \cdot 11300 \cdot 2} \quad L_e = 0.23084 [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

10. Medidas Finais Obtidas:

$$\text{Base} := 3 \cdot a \quad \text{Base} = 15.24 [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{Altura} := 4 \cdot a \quad \text{Altura} = 20.3 [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

$$\text{Comprimento} := b \quad \text{Comprimento} = 5.08 [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

11. Calcula-se o número de condutores e da resistência equivalente:

Comprimento médio de uma bobina:

$$C_{\text{mediobo}} := 2 \cdot a + 2 \cdot b + 0.5 \cdot \pi \cdot a \quad C_{\text{mediobo}} = 28.3 \quad [\text{cm}] \quad (\text{exemplo})$$

Considera-se uma bobina formada por condutores AWG 10, tendo então:

$$A_{ciAWG12} := 3.731 \quad [\text{mm}^2] \quad (\text{exemplo})$$

3. Calcula-se a potência total:

$$W_a := 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot \left(\frac{I_{60\text{pico}}}{\sqrt{2}} \right)^2 + 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \cdot \left(\frac{I_{\text{harmonica}}}{\sqrt{2}} \right)^2 \quad W_a = 987.932 \text{ [VA]} \quad (\text{exemplo})$$

$$W_2 := \frac{W_a}{2} \quad W_2 = 493.966 \text{ [VA]} \quad (\text{exemplo})$$

4. Calcula-se a seção magnética do núcleo:

$$S_m := 7.5 \cdot \sqrt{\frac{W_2}{f}} \quad S_m = 9.624 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (\text{exemplo})$$

$$S_g := 1.1 \cdot S_m \quad S_g = 10.586 \text{ [cm}^2\text{]} \quad (\text{exemplo})$$

Considerando $a=b$ em um núcleo do tipo EI tem-se:

$$a := \sqrt{S_g} \quad a = 3.254 \text{ [cm]} \quad (\text{exemplo})$$

Utiliza-se sempre um valor inteiro maior do que o encontrado, assim:

$$a := 5.08 \text{ [cm]} \quad (\text{exemplo})$$

$$b := 5.08 \quad S_m := a \cdot b$$

5. Calcula-se o número de espiras:

$$\text{EspVolt} := \frac{40}{S_m} \quad \text{EspVolt} = 1.55 \quad (\text{exemplo})$$

$$N := \text{EspVolt} \cdot \Delta V \quad N = 286.88 \quad (\text{exemplo})$$

Arredonda-se o valor encontrado para o número de espiras:

$$N := 287 \quad (\text{exemplo})$$

Especificação do Condutor:

$$S := \frac{I}{3} \quad S = 3.559 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{exemplo})$$

Deve-se escolher uma área sempre um pouco maior do que a encontrada, para que a resistência do enrolamento seja baixa.

$$S := 3.6 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (\text{exemplo})$$

Primeiro Passo: Inserir os dados de projeto

$$C_f := 30.6 \cdot 10^{-6} \quad [F] \quad (\text{valor da capacitância utilizada no filtro - exemplo})$$

$$f_f := 300 \quad [Hz] \quad (\text{frequência de ressonância do filtro - exemplo})$$

$$\omega_{ff} := 2 \cdot \pi \cdot f_f \quad L_f := \frac{1}{\omega_{ff}^2 \cdot C_f}$$

$$L_f = 9.19764 \cdot 10^{-3} \quad [H] \quad (\text{valor determinado da indutância a ser projetada - exemplo})$$

Segundo Passo: Calcula-se a corrente fundamental que circulará pelo indutor.

$$\left| i \cdot 377 \cdot L_f + \frac{1}{i \cdot 377 \cdot C_f} \right| = 83.216 \quad [\Omega] \quad (\text{valor da impedância do filtro a 60 Hz})$$

$$I_{60\text{pico}} := \frac{311}{\left| i \cdot 377 \cdot L_f + \frac{1}{i \cdot 377 \cdot C_f} \right|} \quad I_{60\text{pico}} = 3.737 \quad [A] \quad (\text{exemplo})$$

Terceiro Passo: Determina-se a corrente harmônica e a corrente total do filtro.

$$I_{\text{harmônica}} := 10 \quad [A] \quad (\text{exemplo})$$

$$I_{\text{total}} := \sqrt{(I_{60\text{pico}})^2 + (I_{\text{harmônica}})^2} \quad I_{\text{total}} = 10.676 \quad [A] \quad (\text{exemplo})$$

Quarto Passo: Com as variáveis de projeto determinadas inicia-se o cálculo do indutor.

$$L := L_f \quad (\text{indutância})$$

$$f := f_f \quad (\text{frequência do filtro})$$

$$I := I_{\text{total}} \quad (\text{corrente do filtro})$$

1. Determina-se a reatância:

$$X_{60} := 2 \cdot \pi \cdot L \cdot f \quad X_{\text{harmônica}} := 2 \cdot \pi \cdot L \cdot f_f$$

$$X_{60} = 17.337 \quad X_{\text{harmônica}} = 17.337 \quad [\Omega] \quad (\text{exemplo})$$

2. Calcula-se a queda de tensão no indutor:

$$\Delta V_{60} := X_{60} \cdot I_{60\text{pico}} \quad \Delta V_{ff} := X_{\text{harmônica}} \cdot I_{\text{harmônica}}$$

$$\Delta V_{60} = 64.793 \quad \Delta V_{ff} = 173.371 \quad [V] \quad (\text{exemplo})$$

$$\Delta V := \sqrt{\Delta V_{60}^2 + \Delta V_{ff}^2} \quad \Delta V = 185.083 \quad [V] \quad (\text{exemplo})$$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BARBI, Ivo, "Eletrônica de Potência", 2. ed. Florianópolis: Edição do Autor 1997.
- [2] DIAS, Guilherme A. D., "Harmônicas em Sistemas Industriais", 1. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS 1998.
- [3] I. MILLER, T. J. E., "Reactive Power Control in Electric Systems", 1. ed. United States: Wiley-Interscience 1982.
- [4] Merhij, Saad J.; Nichols, William H., "Harmonic Filtering for the Offshor Industry", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.30, n.3, May/July 1996, pp 535-542.
- [4] Saito, Kunio; Kuwa, Shin-Ichi, "Power Factor and Higher Harmonic Currents of the Electric Power System for a High-Power Three Phase AC Electrified Automated Guideway Transit", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.IA-19, n.6, November/December 1993, pp 1124-1129.
- [5] Witte, J.F.; DeCesaro, F.P., "Damaging Long-Term Overvoltages on Industrial Capacitor Bnaks due to Transformer Energization Inrush Current", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.30, n.4, July/August 1994, pp 1107-1115.
- [6] Michaels, Keneth M., "Sensible Approaches to Diagnosing Power Quality Problems", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.33, n.4, Julho/Agosto 1997, pp 1124-1130.
- [7] Key, Thomas S.; Jih-Shing, Lai "Costs and Benefits of Harmonic Current Reduction for Switch-Mode Power Supplies in a Commercial Office Building", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.32, n.5, September/October 1996, pp 1017-1025.
- [8] Cameron, Malcolm M. "Trends in Power Power Factor Correction with Harmonic Filtering", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.29, n.1, September/October 1996, pp 60-65.
- [9] Cruzs, Thomas M. "A Survey of Neutral Current in Three-Phase Computer Power Systems", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.26, n.4, January/February 1990, pp 719-725.
- [10] Makram, Elham B.; Subramaniam, E.V. "Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data", IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.29, n.6, November/December 1993, pp1177-1183.
- [11] Lai, Jih-Shing; Key, Thomas S. "Effectiveness of Harmonic Mitigation Equipament

for Commercial Office Building”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.33, n.4, July/August 1997, pp 1104-1110.

- [12] Purkayastha, Indrajit; Savoie, Paul J. “Effect of Harmonics on Power Measurement”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.26, n.5, September/October 1990, pp 944-946.
- [14] Girgis, Adly A.; Baldwin, Thomas L. “Testing the Performance of Three-Phase Induction Watthour Meter in ther Presence of Harmonic Distortion”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.26, n.4, July/August 1990, pp 689-695.
- [15] Henderson, Robert D.; Rose, Patrick J. “Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.30, n.3, May/June 1988, pp 528-532.
- [16] Ludbrook, Allan “Harmonic Filters for Notch Reduction”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.24, n.5, September/October 1988, pp 947-954,.
- [17] Phipps, James K.; Nelson, John P. “Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.30, n.2, March/April 1994, pp 476-484.
- [18] Massey, Gregory W. “Estimation Methods for Power System Harmonic Effects on Power Distribution Transformers”, IEEE Transactions on Industry Applications, New York, v.30, n.2, March/April 1994, pp 485-489.
- [19] Kusko, A.; Fellow, Life “Design of Power Harmonic Filters”, Power Quality Proceedings, Paris, November 1990.
- [20] Hibbard, John F. “Understanding and Correcting Harmonic Distortion”, Power Quality Proceedings, Paris, September 1990.
- [21] Lowestien, Michael Z. “Design and Application of Tuned Filters for harmonic Reduction and Power Factor Improvement”, Power Quality Proceedings, Paris, September 1992.
- [22] Stratford, Ray P. “Analysis and Control Harmonic Current in Systems Static Power Converters”, Power Quality Proceedings, Paris, 1989.
- [23] IEEE Standards 519-1992, Reccomended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, New York 1993.
- [24] Phipps, J.K. “A Transfer Function Approach to Harmonic Filter Design”, IEEE Industry Applications Magazine, March/April 1997.
- [25] Kassick, Ênio V. “Harmônicos em Sistemas de Baixa Tensão”, Material Didático e Acadêmico do Cusro de Pós-Graduação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 1998.