

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Felipe Signor

**PROJETO DE DIPLOMAÇÃO**

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA  
HÍBRIDO SEM TRANSFORMADOR**

**Porto Alegre**

**2016**

FELIPE SIGNOR

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA  
HÍBRIDO SEM TRANSFORMADOR**

Projeto de Diplomação apresentado ao  
Departamento de Energia Elétrica da  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul,  
como parte dos requisitos para Graduação  
em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano

Porto Alegre

2016

FELIPE SIGNOR

**ESTUDO E DESENVOLVIMENTO DE UM FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA  
HÍBRIDO SEM TRANSFORMADOR**

Este Projeto de Diplomação foi analisado e julgado adequado para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora designada pelo Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Prof. Dr. Fausto Bastos Líbano

Orientador

---

Prof. PhD. Ály Flores Ferreira Filho

Chefe do DELET

Aprovado em: \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA:

---

Fausto Bastos Líbano (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

---

Roberto Chouhy Leborgne (Prof. Dr.) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo apoio e motivação.

À minha irmã, que me apoiou desde o início de sua vida.

À minha namorada, por tudo, mas principalmente pela paciência.

Aos Professores que a UFRGS me proporcionou.

E a todos que direta ou indiretamente ajudaram a formar meu caráter.

## RESUMO

O aumento das cargas baseadas em eletrônica de potência, com o intuito de aumentar a eficiência do sistema local, traz consigo efeitos nocivos ao sistema como um todo: as distorções harmônicas. Mitigar estes harmônicos no sistema elétrico é uma tarefa fundamental para reduzir as perdas e aumentar a efetividade da energia elétrica, porém a complexidade destas reduções está fortemente atrelada ao crescente número destes dispositivos. Dentre os recursos existentes, os filtros híbridos sem transformador são uma escolha com custo reduzido e com bom desempenho. Por tanto, a proposta deste trabalho é o estudo de um filtro de potência híbrido conectado em uma rede elétrica de baixa tensão (380V), para restringir distorções harmônicas causadas por cargas não lineares e/ou distúrbios da rede elétrica. Esta configuração de filtro ativo é baseada em um inversor tipo fonte de tensão e utiliza uma modulação por largura de pulso SPWM e é conectado ao barramento sem transformador, em paralelo com a carga, por meio de um filtro passivo. Para avaliar a eficiência foram criadas condições de carga e mudanças dinâmicas, com auxílio do *software* PSIM, afim de analisar as respostas do filtro híbrido sem transformador sob condições de funcionamento de equipamentos industriais. Os resultados obtidos destas variações estáticas e dinâmicas de cargas comprovaram que, para a maioria dos casos simulados, o filtro auxilia na redução de harmônicas de corrente e também melhora significativamente o fator de potência do sistema.

Palavras-chave: **Distorções Harmônicas. Qualidade de Energia. Filtro de Potência Híbrido. Filtro Ativo de Potência.**

## **ABSTRACT**

The loads increase based on power electronics, in order to increase the efficiency of the local system, brings harmful effects to the system as a whole: the harmonic distortions. Mitigate these harmonics in the electrical system is a fundamental task to reduce losses and increase electric energy's effectiveness, but the complexity of these reductions is strongly linked to the increasing number of these devices. Among the existing features, a transformerless hybrid filters are a cost-effective choice with good performance. Therefore, the proposal of this work is the study of a hybrid power filter connected in a low voltage electrical network (380V), to restrict harmonic distortions caused by non-linear loads and/or power grid disturbances. This active filter configuration is based on an voltage source inverter (VSI) and uses sinusoidal pulse width modulation SPWM and is connected to the bus without transformer, in parallel with the load, through a passive filter. To evaluate the efficiency, load conditions and dynamic changes were created, with employing PSIM, to analyze the transformer hybrid filter responses under industrial equipment operating conditions. The obtained results of these static and dynamic load variations have shown that, for most simulated cases, the filter assists in the current harmonics reduction and significantly improves the system's power factor.

Keywords:       **Harmonic Distortions. Power Quality. Hybrid Active Power Filter. Active Power Filter.**

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Múltiplas passagens por zero .....	16
Figura 2 – Distúrbios no sinal de tensão elétrica .....	24
Figura 3 - Composição de uma onda pelo somatório de harmônicas .....	27
Figura 4 - Tetraedro das potências .....	32
Figura 5 – Alguns tipos de filtros passivos .....	41
Figura 6 – Impedância de um filtro sintonizado em função da frequência .....	43
Figura 7 - Equivalência filtro sintonizado simples e duplo .....	44
Figura 8 - Curva característica da impedância em função da frequência .....	44
Figura 9 – Banco de filtro sintonizados .....	46
Figura 10 - Impedância do filtro passa alta .....	46
Figura 11 - SPWM.....	48
Figura 12 - Representação da compensação de corrente .....	49
Figura 13 - FAS como compensador de tensão .....	51
Figura 14 - FAS compensador de correntes harmônicas .....	52
Figura 15 – Ligação de um FAPH com transformador .....	53
Figura 16 - Circuito completo .....	56
Figura 17 - Sistema de coordenadas a-b-c e $\alpha$ - $\beta$ .....	57
Figura 18 - Diagrama de blocos do controlador .....	58
Figura 19 - Circuito equivalente .....	60
Figura 20 – Circuito de potência .....	63
Figura 21 – PLL e gerador de referência síncrona .....	63
Figura 22 – Circuito do controle.....	64
Figura 23 - Carga CC puramente resistiva .....	65
Figura 24 - Sinais do controle e PWM .....	66
Figura 25 – Correntes no circuito .....	67
Figura 26 – FFT das correntes .....	67
Figura 27 – Correntes sem o controle <i>feedforward</i> .....	68
Figura 28 – FFT das correntes sem <i>feedforward</i> .....	68
Figura 29 – Comportamento das harmônicas com ganho $k=0$ .....	70
Figura 30 – Carga do Caso 2 .....	71
Figura 31 - Correntes no circuito para o Caso 2.....	72
Figura 32 - Tensão no capacitor de acoplamento e no filtro .....	73
Figura 33 - Correntes harmônicas para o Caso 3.....	74

Figura 34 - Carga RLC .....	74
Figura 35 - Correntes harmônicas para o Caso 4.....	75
Figura 36 – Carga RC.....	76
Figura 37 - Correntes harmônicas para o Caso 5.....	76
Figura 38 - Comutação de carga.....	77
Figura 39 - Correntes harmônicas do Caso 6 .....	78
Figura 40 - Pico e afundamento de tensão.....	79
Figura 41 – Tensões e correntes do Caso 6 .....	79
Figura 42 – Correntes com controle da comutação .....	80
Figura 43 - Inversor com motor sob carga mecânica .....	81
Figura 44 - Correntes do Caso 7 .....	82
Figura 45 - Tensões no capacitor do link CC e no de acoplamento .....	83
Figura 46 - FFT do Caso 7 .....	83
Figura 47 - Carga não linear com filtro indutivo no link CC .....	84
Figura 48 - Característica predominante resistiva .....	85
Figura 49 - Notch de tensão da fonte.....	85
Figura 50 - Carga predominantemente capacitiva.....	86
Figura 51 – Carga predominantemente indutiva .....	87



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos classificados pelo IEC.....	21
Tabela 2 - Categorias e Características típicas de fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos.....	22
Tabela 3 - Tipos de cargas não lineares.....	29
Tabela 4 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais.....	33
Tabela 5 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) .....	33
Tabela 6 – Limites de distorção de tensão.....	34
Tabela 7 – Limites de distorção de corrente em relação à corrente fundamental .....	35
Tabela 8 – Limites para harmônicos de corrente.....	36
Tabela 9 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental.....	37
Tabela 10 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental.....	37
Tabela 11 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental.....	38
Tabela 12– Respostas dos métodos de controle .....	54
Tabela 13 – Correntes para simulação com e sem controle <i>feedforward</i> .....	69
Tabela 14 – Correntes harmônicas com impedância $(10 + j1m)$ .....	71
Tabela 15 – Correntes harmônicas com impedância $(30 + j1m)$ .....	73
Tabela 16 – Correntes harmônicas para impedância $((30 + j1m) \parallel j1500\mu)$ .....	75
Tabela 17 – Correntes harmônicas com impedância $(30 + j1500\mu)$ .....	77
Tabela 18 – Correntes harmônicas com comutação .....	80
Tabela 19 – Correntes harmônicas operando um inversor sob carga .....	82
Tabela 20 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC.....	84
Tabela 21 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC.....	86
Tabela 22 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC.....	87

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
DDT	Distorção de Demanda Total
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTi	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHTv	Distorção Harmônica Total de Tensão
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
FAHP	Filtro Ativo Híbrido em Derivação/Paralelo
FAP	Filtro Ativo em Derivação/Paralelo
FAS	Filtro Ativo Série
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Fator de Potência
FPD	Fator Potência de Deslocamento
Hz	Hertz
IEC	International Electrotechnical Commission
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
$I_{sc}$	Corrente de Curto Circuito
L	Indutor
LC	Ligação Série Indutor-Capacitor
LED	Light Emitting Diode
PA	Filtro Passa-Altas
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PB	Filtro Passa-Baixas
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
R	Resistor

RP	Regime Permanente
SRF	<i>Synchronous Reference Frame</i>
TRC	Tubo de Raio Catódico
V	Volts
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>
$\omega$	Frequência angular

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1 MOTIVAÇÃO.....	15
1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	15
1.3 OBJETIVO .....	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	16
<b>2. QUALIDADE DE ENERGIA</b> .....	18
2.1 TRANSITÓRIOS .....	24
2.2 VARIAÇÕES DE CURTA DURAÇÃO.....	24
2.3 VARIAÇÕES DE LONGA DURAÇÃO .....	25
2.4 DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO.....	25
2.5 DISTORÇÕES NA FORMA DE ONDA.....	25
<b>2.5.1 Inter-harmônicos</b> .....	25
<b>2.5.2 Nível CC</b> .....	26
<b>2.5.3 Notching</b> .....	26
<b>2.5.4 Ruído</b> .....	27
<b>2.5.5 Harmônicas</b> .....	27
2.6 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO .....	38
2.7 VARIAÇÕES NA FREQUÊNCIA .....	38
<b>3. SISTEMAS DE FILTRAGEM</b> .....	40
3.1 FILTROS PASSIVOS .....	40
3.2 FILTROS ATIVOS .....	47
3.3 FILTROS HÍBRIDOS .....	51
3.4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA FILTROS ATIVOS .....	53
<b>4. ESTUDO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO SEM TRANSFORMADOR</b> 55	
4.1 DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO FILTRO.....	55
4.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE.....	56
4.3 COMPORTAMENTO DO FILTRO .....	60

<b>5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS</b> .....	62
5.1 CARGA R $10\Omega$ - CASO 1 .....	65
5.2 CARGA RL $(10 + j1m)\Omega$ - CASO 2 .....	70
5.3 CARGA RL $(30 + j1m)\Omega$ - CASO 3 .....	73
5.4 CARGA RLC $((30 + j1m) \parallel j1500\mu)\Omega$ - CASO 4.....	74
5.5 CARGA RC $(10 \parallel -j1500\mu)$ - CASO 5.....	76
5.6 COMUTAÇÃO DE CARGA RLC - CASO 6 .....	77
5.7 INVERSOR COM MOTOR (CONJUGADO MECÂNICO 20Nm) - CASO 7 ...	81
5.8 FILTRO INDUTIVO NO LINK DC - CASO 8.....	84
<b>6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>88</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	90
<b>ANEXO A – Laplace <math>F(s + j\omega)</math></b> .....	95
<b>ANEXO B – Série de Fourier</b> .....	95

## 1. INTRODUÇÃO

O aumento das cargas baseadas em eletrônica de potência, tais como fontes chaveadas de alta potência, inversores de frequência, tiristores, chaveamento de compensadores estáticos, conversores CA-CC e outros equipamentos com funcionamento baseado em chaveamento, poluem os sinais do sistema elétrico degradando a Qualidade da Energia Elétrica.

Devido à proliferação destas cargas não-lineares, os problemas causados pelos harmônicos são cada vez mais atuantes. Ao contrário da carga linear, o dispositivo eletrônico de potência controla o fluxo de energia chaveando as formas de onda da tensão e da corrente. Assim, corrente consumida apresenta altos índices de distorção harmônica e aspectos das distorções, que não foram detalhadamente estudados no passado, passam a ser significativos, ocasionando redução da vida útil de transformadores e, em casos extremos, a explosão de bancos de capacitores.

Soluções passivas para reduzir harmônicos tiveram boa aceitabilidade no passado – quando Qualidade de Energia significava apenas evitar interrupção no fornecimento. A desvantagem destes sistemas de filtragem são as características de variação de impedância com fatores climáticos e também a característica de compensação fixa, tornando-os ineficientes para grandes variações de espectro. Além disso, os filtros passivos podem entrar em ressonância com o sistema tendo efeito contrário ao qual foi proposto.

Contudo, nas últimas décadas, os equipamentos com circuitos de eletrônica de potência também são os responsáveis por mitigar as harmônicas do sistema elétrico, sendo que foram desenvolvidos para suprir as distorções harmônicas de correntes e compensar reativos. As principais configurações dos filtros ativos são a série, paralela e híbrida.

Neste trabalho é proposto o estudo de um sistema de filtragem utilizado em potências acima de 20kW, para validação do seu uso em um sistema de até 20kW. O sistema consiste em um filtro híbrido conectado em paralelo a uma rede composta por uma fonte e uma retificador trifásico. O filtro ativo aprimora as características de filtragem passiva, gerando uma tensão equivalente para manter a corrente harmônica da fonte, método conhecido como impedância variável.

A eficiência do sistema foi comprovada por meio de simulação numérica com auxílio do *software* PSIM versão 9.0. Variou-se o tipo de carga com o objetivo de validar o funcionamento do filtro em cargas menores da qual foi proposto por seus autores e obteve-se dados que provaram a eficiência do filtro em um ambiente com variação de carga.

## 1.1 MOTIVAÇÃO

Devido ao crescimento do fenômeno da “Indústria 4.0” (quarta Revolução Industrial), que promove a informatização da manufatura e processo de mecanização, controle e virtualização de processos, a tendência é o aumento da utilização de equipamentos com controle e comando eletrônico de potência, que geram um alto nível de harmônicos: indesejáveis ao sistema elétrico.

Dada a complexidade associada ao processo de filtragem destes harmônicos e a falta de legislação nacional que regulamente seus níveis máximos, cabe investigar as principais metodologias de mitigação destes distúrbios visando a melhoria do sistema elétrico, reduzindo o desgaste dos equipamentos e aumentar sua confiabilidade.

Tendo em vista estes aspectos percebeu-se a necessidade de estudar o filtro ativo híbrido sem transformador como proposta para mitigação dos distúrbios harmônicos de corrente e avaliar sua eficiência.

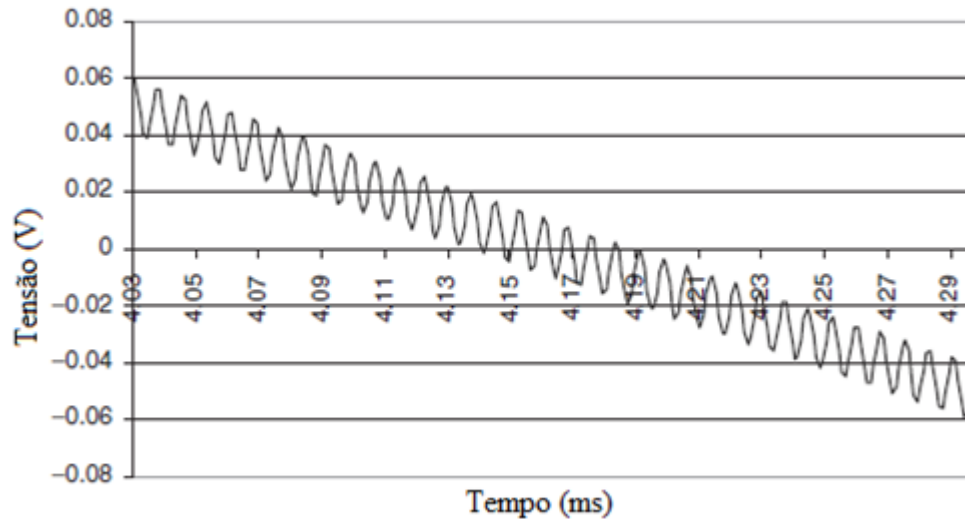
## 1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

De acordo com Paulilo e Teixeira (2013) há relatos relacionados a harmônicos em sistemas elétricos na década de 1920, devido a instalação de conversores em refinarias de cobre nos Estados Unidos. Tais efeitos provocaram interrupções em sistemas telefônicos, o que ocorreu similarmente em uma mineração no Canadá.

Em relação a esse assunto Garcia [21--?] também afirma que este tipo de evento se repetiu por diversas vezes, quando as instalações dos conversores de energia elétrica compartilhavam o mesmo caminho das linhas de comunicação.

Para Halpin e Card (2011) a maioria dos equipamentos podem operar de modo satisfatório desde que as distorções das tensões nos terminais não excedam 5% do valor nominal. A exceção são equipamentos eletrônicos que detectam o cruzamento por zero (zero Volts) que, quando recebem um sinal distorcido por harmônicas, podem detectar múltiplas passagens por zero. A Figura 1 representa uma onda fundamental de 60Hz somada com uma componente harmônica de 3kHz @ 1% da tensão nominal.

Figura 1 - Múltiplas passagens por zero



Fonte: Halpin e Card (2011), adaptado

Em circuitos com semicondutores e em circuitos que trabalham com chaveamento (*on-off*) a variação da impedância causa mudanças abruptas na condução de corrente elétrica que, apesar de terem uma eficiência elétrica superior aos circuitos resistivos, causam distorções harmônicas. Essas distorções em corrente elétrica, ao interagirem com a rede elétrica, causam distorções na tensão elétrica ou em casos extremos entram em ressonância com outros elementos do sistema.

### 1.3 OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é utilizar um filtro de potência híbrido sem transformador para reduzir o nível de distorções harmônicas de corrente e avaliar, por meio de simulações, o seu funcionamento quando submetido às principais cargas de um sistema industrial, observando sua resposta a esta dinâmica. Deseja-se reduzir as distorções harmônicas à grandezas aceitáveis, definidas por normativas e práticas recomendadas, tal como a IEEE std 519.

### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Para alcançar o objetivo proposto, o presente trabalho está estruturado em seis capítulos, incluindo este introdutório, como indicado a seguir.

No Capítulo 2 é feita uma revisão sobre Qualidade de Energia Elétrica, definido e abordado os principais fenômenos causadores de distúrbios no sistema elétrico. Devido ao



objetivo proposto, é dado ênfase no fenômeno das harmônicas, suas causas, seus efeitos no sistema e nas formas mais comuns de quantificar seus níveis; ainda são citadas as principais normas que regulamentam os limites de harmônicas.

No Capítulo 3 são apresentados os principais sistemas de filtragem de harmônica: filtros passivos, ativos e híbridos. São demonstradas as principais topologias passivas, sendo apresentada a formulação clássica, e também uma análise qualitativa acerca do seu funcionamento. Após são apresentados os filtros ativos e híbridos tendo em vista a exposição das vantagens e de como são constituídos. O capítulo é finalizado com uma revisão dos principais métodos de controle utilizados nos filtros ativos.

No Capítulo 4 é realizado um estudo direcionado ao sistema de filtragem híbrido, em especial ao sem transformador. É dado ênfase em uma topologia já consolidada, são apresentadas as qualidades do controle e as características da filtragem.

O Capítulo 5 trata das simulações da aplicação do filtro ativo híbrido sem transformador, onde são analisadas diferentes cargas, mudanças nos parâmetros do circuito e a resposta dinâmica deste filtro com o intuito de utilizá-lo em equipamentos industriais de baixa potência.

Por fim, no Capítulo 6 são realizadas as conclusões do estudo e propostas para novos trabalhos.

## 2. QUALIDADE DE ENERGIA

“Qualidade da energia elétrica (QEE) é a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízo de desempenho e de vida útil.” (LEÃO, SAMPAIO e ANTUNES, 2014). De acordo com os autores a expressão é usada para descrever a condição do sinal elétrico que aciona uma carga, fazendo-a operar adequadamente. Com uma alimentação inadequada, a carga pode funcionar com desvios, falhar prematuramente ou até mesmo não funcionar.

Leão, Sampaio e Antunes (2014) inferem que o sinal de tensão elétrica usado como padrão de qualidade tem forma de onda alternada senoidal, de frequência fixa e variação de amplitude conforme a modalidade do atendimento: baixa tensão, média tensão ou alta tensão. No entanto, em cada modalidade, o valor eficaz da tensão deve estar dentro de faixas preestabelecidas; a corrente elétrica deve ter mesma forma de onda da tensão e manter o deslocamento angular dentro de uma faixa também preestabelecida. Para sistemas em corrente contínua (CC) a tensão deve manter um valor fixo, sem ondulações e com polaridade constante.

A qualidade da energia elétrica abrange uma variedade de fenômenos eletromagnéticos que levam ao desvio na forma de onda da tensão e corrente.

Com outro ponto de vista, Bollen (2003) diz que podem haver confusões quanto aos conceitos vinculados à qualidade de energia e lista um conjunto de definições:

- a) Qualidade de Tensão - diz respeito aos desvios tensão do ideal. A tensão elétrica ideal é uma onda senoidal pura, de amplitude e frequência constantes;
- b) Qualidade de Corrente - é o termo complementar à qualidade de tensão: trata-se do desvio de corrente a partir do ideal. A corrente ideal é novamente uma onda senoidal de frequência única, em amplitude e frequência, tendo com o requisito adicional que a onda de corrente deve estar em fase com a de tensão;
- c) Qualidade de energia - é a combinação da qualidade de tensão elétrica e da qualidade de corrente elétrica;
- d) Qualidade de fornecimento - é uma combinação de qualidade de tensão e os aspectos não-técnicos da interação entre a rede de energia para seus clientes;
- e) Qualidade de consumo - é um termo complementar para qualidade de fornecimento.

Bollen (2003) explica que todos estes termos são comumente empregados, porém a qualidade de corrente e a qualidade do consumo são usados com mais frequência. Outros autores dão definições distintas, muitas vezes conflitantes, entretanto todas as definições acima

referidas aplicam-se à interface entre o cliente e a rede principal. Esta pode ser, por exemplo, um cliente doméstico e uma rede de distribuição de baixa tensão, uma planta individual e uma rede de distribuição de média tensão, uma central elétrica e uma rede de transmissão, ou uma rede de transmissão e uma rede de distribuição. O termo qualidade de energia não está restrito à interação entre a rede elétrica e o equipamento do usuário final.

De acordo com Dugan et al. (2004), a qualidade de energia tem sido um tema de crescente interesse tanto de concessionárias de energia elétrica, quanto de consumidores finais nos últimos anos. A novidade é que os engenheiros estão tratando os fenômenos como sistemas complexos, em vez de tratá-los como problemas individuais.

A preocupação com a qualidade de energia, segundo o autor, deve-se principalmente a quatro razões, sendo a primeira delas os equipamentos de carga de nova geração, com controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de potência, que são mais sensíveis à variações de qualidade de energia, do que os equipamentos utilizados no passado.

A segunda razão, segundo Dugan et al. (2004), é o crescimento contínuo na aplicação de dispositivos como os de alta eficiência, inversores para ajuste de velocidade de motores e capacitores paralelo (*shunt*) para a correção do fator de potência, preocupando-se apenas com a eficiência local do sistema. Isso tem causado elevação dos níveis harmônicos no sistema de potência, preocupado muitas pessoas com o impacto futuro sobre a capacidade de carga do sistema.

A terceira razão citada por Dugan et al. (2004), é a maior consciência por parte dos consumidores finais em relação aos problemas de qualidade de energia. Os clientes de concessionárias estão cada vez mais informados sobre questões como interrupções, afundamentos de tensão e impulsos de manobra, assim há maior cobrança por melhorias na qualidade da energia entregue.

A última razão listada pelo autor para o aumento de interesse pela qualidade de energia é o fato de muitos dispositivos estarem interconectadas em uma rede elétrica, e estes processos integrados significam que a falha de qualquer componente tem consequências mais graves.

Singh, Chandra e Al-Haddad (2015) explicam que os problemas de QEE afetam direta ou indiretamente, em termos de perdas financeiras, todas as concessionárias envolvidas, clientes finais e empresas; devido a interrupções de processos, danos a equipamentos, perdas de produção, desperdício de matérias primas, e assim por diante. Há muitas situações onde isso se aplica, como por exemplo: processos industriais automatizados, onde até mesmo pequenos afundamentos momentâneos de tensão causam interrupções de processos por horas.

De acordo com Rodrigues (2009), para os consumidores residenciais, caso não haja falta de energia por períodos de tempo muito longos, não haverá grandes aborrecimentos ou prejuízos, pois, a qualidade da energia é avaliada realmente pela sua falta. Porém, nos setores comercial e industrial são utilizados equipamentos de alta tecnologia e que são extremamente sensíveis a qualquer tipo de perturbação. Nesse caso, mesmo que a energia falte por um intervalo de tempo pequeno, chegando a menos de um segundo, todo o processo industrial pode ser alterado. Por isso, é muito importante que a energia seja entregue pela concessionária livre de distúrbios.

Singh, Chandra e Al-Haddad (2015), complementam que alguns problemas de QEE afetam o sistema de proteção e resultam em má operação destes dispositivos e, por falha de operação da proteção, interrompem processos em indústrias e estabelecimentos. Além do mais, estes problemas podem afetar o sistema de monitoramento de equipamentos importantes, críticos, vitais, e de emergências.

Segundo Paulilo (2013), o termo qualidade de energia abrange áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas pertinentes a comunicação em redes de transmissão de dados. Sendo assim, os vários fenômenos que estão a ela ligados, precisam ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, foi instituída através da Lei nº 9.427/1996 e do Decreto nº 2.335/1997, com a finalidade de regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, em conformidade com as políticas e diretrizes do governo federal.

A ANEEL, segundo Sarmanho (2005), tem o papel de promover a qualidade da energia, regulamentando padrões afim de garantir que sejam cumpridos, viabilizar melhorias, zelando direta ou indiretamente pela observância da legislação e punindo os infratores quando necessário. Também é responsável por criar indicadores, com o intuito de acompanhar o desempenho da concessionária e estabelecer metas para a melhoria contínua da qualidade.

Elaborado pela ANEEL (2016), o documento “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Interligado Nacional” (PRODIST) – Módulo 8, estabelece os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. Tais procedimentos definem limites práticos para melhorar a qualidade da energia elétrica em regime permanente (RP) ou transitórios. Nesse módulo são definidos os fenômenos, os parâmetros, as amostras e o modo de medição, o processo e

periodicidade de coleta de dados e o envio das informações relativas à qualidade da energia e de seu fornecimento à ANEEL.

Os principais órgãos internacionais de normatização do setor elétrico e eletrônico são a europeia International Electrotechnical Commission (IEC), e o americano Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). As publicações de ambas organizações servem como base para normas regulamentadoras em diversos países, como por exemplo o Brasil.

Segundo a ANEEL (2014), a IEC publica documentos para uso internacional, em formato de normas, relatórios técnicos e manuais, com a finalidade de promover a cooperação em questões relativas a normas, recomendações e orientações no contexto elétrico e eletrônico. Já a IEEE não apresenta uma documentação tão estruturada e abrangente, quando comparada as normas da IEC, porém, proporciona um conhecimento mais prático e teórico em relação à área de qualidade de energia, tornando-se uma referência mais aplicada, mesmo fora dos Estados Unidos.

Extraída da IEEE Std. 1159-1995 apud Sarmanho (2005), na Tabela 1 podem ser consultados, como são divididos em grupos e classificados, os principais fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos.

Tabela 1 - Principais fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos classificados pelo IEC

(continua)

<b>Fenômenos conduzidos de baixa frequência</b>	Harmônicas, inter-harmônicas
	Sinais de sistemas (portadoras)
	Flutuações na tensão
	Afundamentos de tensão e interrupções
	Desbalanceamento de tensão
	Variação da frequência da rede elétrica
	Tensões induzidas de baixa frequência
	CC em redes CA
<b>Fenômenos Irrradiados de Baixa Frequência</b>	Campos magnéticos
	Campos elétricos

(conclusão)

<b>Fenômenos Conduzidos de Alta Frequência</b>	Ondas contínuas conduzidas de tensão e corrente Transitórios unidirecionais Transitórios oscilatórios
<b>Fenômenos Irrradiados de Alta Frequência</b>	Campos Magnéticos Campos Elétricos Campos Eletromagnéticos Ondas Contínuas Transitórios
<b>Fenômenos de Descarga Eletrostática</b>	
<b>Pulsos Eletromagnéticos Nucleares</b>	

Fonte: IEEE Std. 1159-1995 apud Sarmanho (2005)

Sarmanho (2005) acrescenta ainda, que além desta classificação feita pelo IEC, os fenômenos podem ser separados em diferentes categorias, uma vez que existem diferentes soluções para o problema de qualidade de energia, conforme a intensidade e duração destes fenômenos. Estas categorias podem ser vistas na tabela 2.

Tabela 2 - Categorias e Características típicas de fenômenos causados por distúrbios eletromagnéticos

(continua)

Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude da Tensão Típica
1 Transitório			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanossegundo	5 ns de subida	< 50 ns	
1.1.2 Microssegundo	1 $\mu$ s de subida	50 ns – 1 ms	
1.1.3 Milissegundo	0,1 ms de subida	> 1 ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa Frequência	<5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 $\mu$ p
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 $\mu$ s	0 – 8 $\mu$ p
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 $\mu$ s	0 - 4 $\mu$ p
2 Variações de Curta Duração			
2.1 Instantânea			

(conclusão)

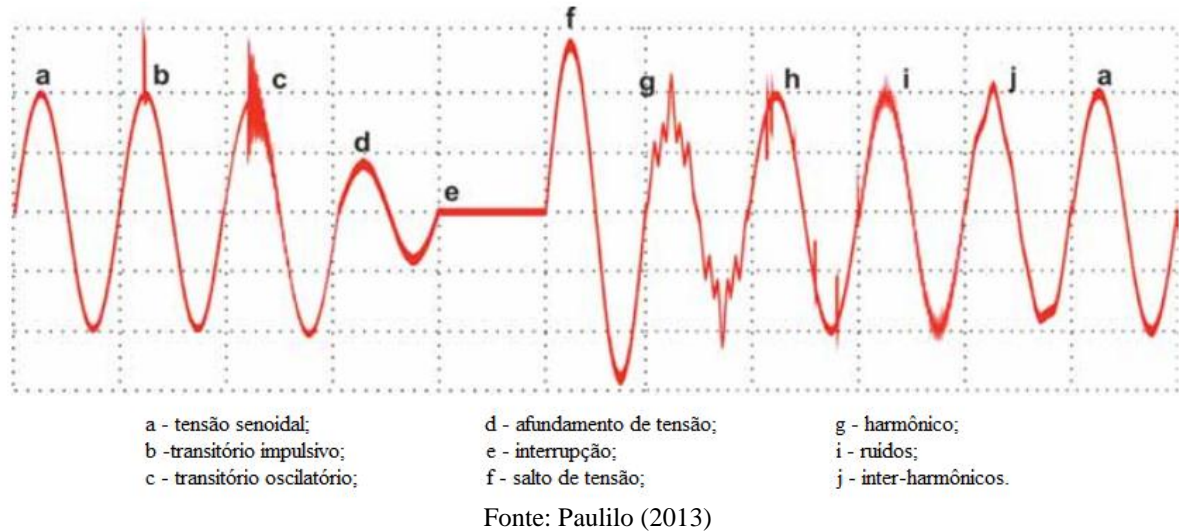
Categoria	Conteúdo Espectral Típico	Duração Típica	Magnitude da Tensão Típica
2.1.1 Subtenção (Sag)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.2 Sobretensão (Swell)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2 Momentânea			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
2.2.2 Subtenção (Sag)		30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3 Sobretensão (Swell)		30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
2.3 Temporária			
2.3.1 Interrupção		3 s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2 Subtenção (Sag)		3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3 Sobretensão (Swell)		3 s – 1 min	1,1,- 1,2 pu
3 Variação de Longa Duração			
3.1 Interrupções, sustentadas		> 1 min	0 pu
3.2 Subtensão		> 1 min	
3.3 Sobretensão		> 1 min	
4 Desbalanceamento de Tensão		Regime Permanente	0,5 – 2%
5 Distorções na Forma de Onda			
5.1 Nível DC		Regime Permanente	0 – 0,1%
5.2 Harmônicas		Regime Permanente	0 – 20%
5.3 Inter-harmônicas		Regime Permanente	0 – 2%
5.4 Impulso		Regime Permanente	
5.5 Ruído		Regime Permanente	0 – 1%
6 Flutuação de Tensão		Intermitente	0,1 – 7%
7 Variações na Frequência		< 10 s	

Fonte: IEEE Std. 1159-1995 apud Sarmanho (2005)

É interessante verificar os efeitos que principais distúrbios causam na tensão elétrica, conforme apresentando na Figura 2.

Para melhor compreensão do assunto, faz-se necessário a conceituação de algumas definições, que serão citadas a seguir dando maior ênfase nos que diz respeito a harmônicos, haja vista o objetivo proposto neste trabalho.

Figura 2 – Distúrbios no sinal de tensão elétrica.



## 2.1 TRANSITÓRIOS

De acordo com Paulilo (2013), transitórios são fenômenos eletromagnéticos, geralmente de curta duração, que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. São provenientes de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica e podem ser classificados como: impulsivos, causados por descargas atmosféricas, ou oscilatórios, causados por chaveamentos.

## 2.2 VARIAÇÕES DE CURTA DURAÇÃO

As variações de tensão de curta duração, segundo Paulilo (2013), podem ser definidas como instantâneas, momentâneas ou temporárias. Normalmente, essas variações de tensão são ocasionadas pela energização de grandes cargas, que demandam altas correntes de partida, ou por intermitentes falhas nas conexões dos cabos de sistema. Conforme o local da falha e as condições do sistema, poderá se ter como resultado um afundamento momentâneo de tensão (*sag*), uma elevação momentânea de tensão (*swell*), ou até mesmo uma interrupção completa do sistema elétrico.



## 2.3 VARIAÇÕES DE LONGA DURAÇÃO

As variações de tensão de longa duração são fenômenos parecidos com as variações de tensão de curta duração, mas tem com diferencial o fato de se manterem por tempos superiores a três minutos no sistema elétrico, explica Paulilo (2013). São ocasionadas por saídas de grandes blocos de carga, perdas de fase, dentre outras.

## 2.4 DESBALANCEAMENTO DE TENSÃO

Sarmanho (2005) define o fenômeno de desbalanceamento de tensão como a razão entre a componente negativa de uma sequência e a componente positiva desta mesma sequência, sendo comumente causado por cargas desbalanceadas. Este fenômeno pode ser determinado através da razão entre o desvio máximo e a média dos valores de tensão ou corrente nas três fases, o qual é expresso percentualmente.

De acordo com o módulo 8 do PRODIST (2016) o valor de referência nos barramentos do sistema, exceto baixa tensão, deve ser menor igual a 2%. Tal valor serve como base para planejamento elétrico em termos de QEE e, futuramente, será de caráter regulatório.

## 2.5 DISTORÇÕES NA FORMA DE ONDA

Para Paulilo (2013), a distorção da forma de onda é definida como um desvio da forma de onda puramente senoidal, em regime permanente e na frequência fundamental. Este desvio é caracterizado principalmente pelo seu conteúdo espectral: com elevado número de frequências. Existem cinco tipos principais de distorções da forma de onda: Inter-harmônicos, Nível CC, Notching, Ruído e Harmônicos.

### 2.5.1 Inter-harmônicos

De acordo com Paulilo (2013), inter-harmônicos são componentes harmônicos, em tensão ou corrente, que não são múltiplos inteiros da frequência fundamental do sistema. As frequências inter-harmônicas podem ser discretas ou abranger uma larga faixa espectral, sendo encontrado em várias faixas de tensão. As suas principais fontes são conversores estáticos de potência, ciclo-conversores, motores de indução e equipamentos a arco. Os efeitos deste fenômeno ainda não são bem conhecidos, mas admite-se que podem afetar a transmissão de

sinais *carrier* e induzir *flicker* no display de equipamentos como tubos de raios catódicos (TRCs).

### 2.5.2 Nível CC

Paulilo (2013) cita que a presença de tensão contínua ou corrente contínua em um sistema elétrico CA é denominado *DC offset*. Este fenômeno pode ocorrer como o resultado da operação ideal de retificadores de meia-onda. A presença de nível CC em sistemas CA pode acarretar a saturação de transformadores de potência, elevando as perdas na transformação e a redução da vida útil dos equipamentos.

### 2.5.3 Notching

Dias (2002) define *notch* como uma distorção na onda de tensão devido a curtos trifásicos momentâneos no sistema quando ocorre a comutação das chaves em conversores estáticos. A amplitude do corte é uma função do tempo de comutação e da reatância da fonte vista pelo conversor.

A comutação das chaves causam uma variação brusca de corrente – uma derivada de alto valor – o que drena muita energia da fonte, fazendo com que haja uma queda de tensão. Para equipamentos eletrônicos as altas frequências na onda de tensão podem ocasionar mau funcionamento, principalmente em equipamentos com *zero-crossing*.

### 2.5.4 Ruído

Para Paulilo (2013), o ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, que contém uma larga faixa espectral de frequências de até 200kHz as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, que também podem ser encontrados no condutor neutro. São causados por equipamentos eletrônicos de potência, circuitos de controle, equipamentos a arco e retificadores a estado sólido.

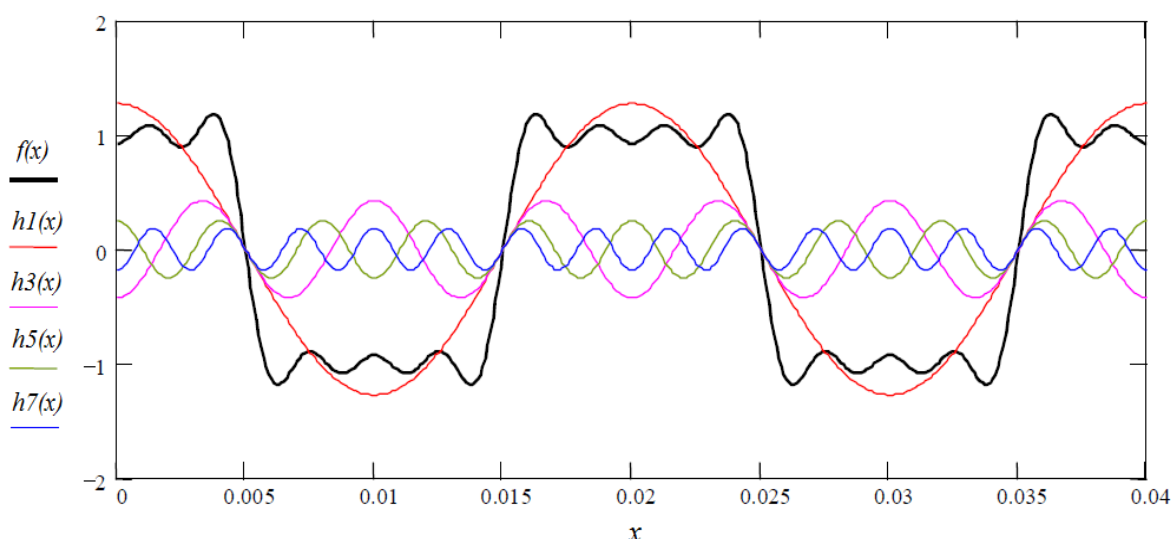
Já para Dias (2002), esse tipo de fenômeno compreende uma faixa de até 2MHz e estão normalmente associado a operações defeituosas ou instalações inadequadas de componentes ao sistema elétrico, como por exemplo: isoladores defeituosos, operação de disjuntores, máquinas de solda, conexões, problemas de dimensionamento entre outros.

### 2.5.5 Harmônicos

Para Lander (1993), qualquer onda periódica pode ser composta pela superposição de suas componentes médias com a componente fundamental pura de uma onda senoidal. As ondas senoidais com frequências de múltiplo inteiro da onda senoidal pura, são conhecidas como harmônicas.

Graficamente, qualquer sinal pode ser descrito por ondas senoidais com frequência múltipla da fundamental. A Figura 3 representa uma função  $f(x)$ , composta pela soma de sua componente fundamental,  $h1(x)$ , e suas harmônicas;  $h3(x)$ ,  $h5(x)$  e  $h7(x)$  (frequências múltiplas à fundamental). Tal função se aproxima de uma onda quadrada e ao passo que infinitas harmônicas sejam somadas, melhor será a representação.

Figura 3 - Composição de uma onda pelo somatório de harmônicas



Fonte: Deckmann e Pomilio (2016), adaptado

De acordo com Dias (2002), as harmônicas são componentes de alta frequência que, quando presentes no sistema elétrico, provocam diversos fenômenos comprometendo a qualidade do fornecimento de energia ou a operação da concessionária e do próprio consumidor (principalmente na faixa de 60 Hz a 3 kHz).

A presença de harmônicas no sistema de potência, segundo Garcia [21--?], propicia gastos financeiros desnecessários para concessionárias e usuários, portanto, deve ser vista como indesejável. Ele explica que, se por um lado a empresa perde pela parada de produção, a concessionária perde no faturamento. Além disso, de maneira geral, os harmônicos são

responsáveis por perdas ôhmicas, por solicitações anormais de isolamento e pela má operação de equipamentos.

Rodrigues (2009) afirma que o consumidor é responsável pela quantidade de corrente harmônica introduzida no sistema, pois é o dono da carga não linear. Contudo, a responsabilidade pelo controle da distorção de tensão passa a ser da concessionária se a corrente harmônica injetada pelo consumidor estiver dentro de limites razoáveis.

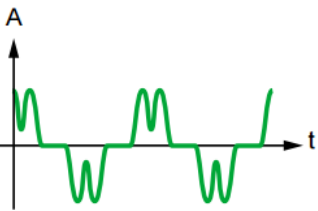
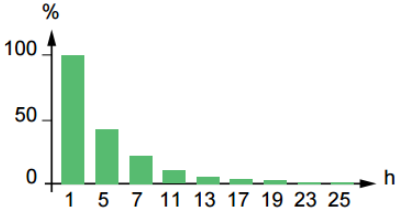
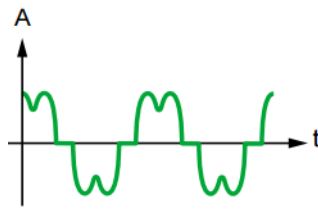
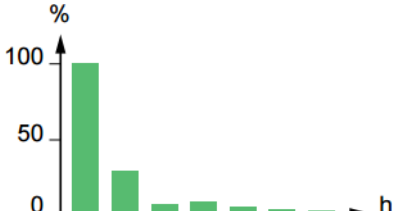
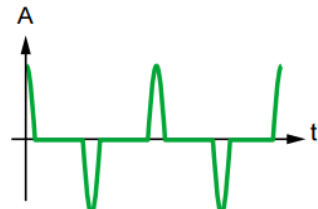
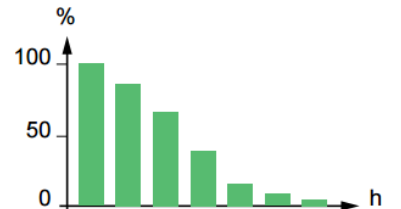
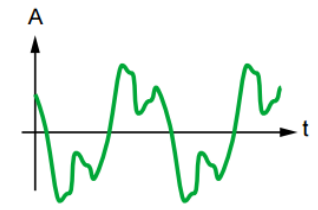
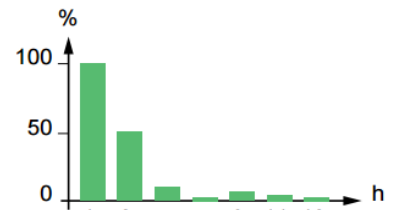
Rodrigues (2009), explica também que inúmeros dispositivos presentes no sistema de distribuição são afetados pelas distorções harmônicas, como banco de capacitores, dispositivos de proteção e manobra, transformadores, e até mesmo os sistemas de medição de energia elétrica. Sendo assim, torna-se importante realizar trabalhos a fim de se verificar os erros de registro destes medidores, evitando prejuízos financeiros para concessionárias e consumidores.

Deckmann e Pomilio (2009) descrevem que os efeitos das harmônicas são nocivos, aumentando perdas do sistema, erros de medição, falhas de controle, entre outros. Com o intuito de minimizar a magnitude de harmônicos no sistema elétrico, recorre-se a filtragem: da tensão e/ou corrente elétrica. Também citam que os filtros passivos são dimensionados de tal forma a drenar ou bloquear as componentes harmônicas.

Em instalações industriais a primeira evidência de excesso de harmônicas, segundo Acha et al. (2002), é a abertura de fusíveis de capacitores ou até mesmo a falha dos bancos de capacitores. Cita também que o excesso de correntes harmônicas aumenta o stress por sobre tensão e aumentando, também, os níveis de temperatura: resultando na redução da vida útil dos equipamentos da planta.

As distorções normalmente são resultados de cargas não lineares como por exemplo, transformadores saturados, retificadores, motores de indução, inversores e compensadores estáticos reativos. Na tabela 3 são apresentados alguns tipos de cargas não lineares, sua forma de distorção em corrente e o espectro harmônico.

Tabela 3 - Tipos de cargas não lineares

Cargas não-lineares	Corrente	Espectro harmônico	DHT
Variador de velocidade para motores			44%
Retificador trifásico, carregador			28%
Retificador monofásico, computadores, eletrodomésticos			115%
Lâmpada fluorescente			53%

Fonte: Ferracci (2001), adaptado.

Devido aos problemas citados em sistemas com presença de harmônicos cabe investigar metodologias de medição, quantização e normatizações com o intuito de determinar ações corretivas para a otimização do sistema elétrico como um todo. Para tal, a análise dos harmônicos é necessária e para um sinal periódico ela consiste em determinar as amplitudes, a fase da componente fundamental e a fase das componentes harmônicas.

Normalmente a ferramenta matemática utilizada na análise harmônica é a série de Fourier, descrita no Anexo B, fazendo uso do domínio da frequência para simplificar a representação dos sinais no tempo. Uma decomposição do sinal no espectro harmônico pode separar os componentes pares e ímpares de frequência e também o nível CC.

Melo (2010) cita que cargas não lineares geradoras de harmônicos (como inversores e retificadores), não geram valores harmônicos pares, visto que funcionam de forma simétrica e periódica. Conforme descrito no Anexo B, pela teoria de Fourier, para todo sinal periódico e simétrico (em relação ao eixo do tempo) os componentes pares se anulam.

A Distorção Harmônica Total (DHT) é uma medida do valor eficaz das componentes harmônicas de uma forma de onda distorcida em relação a sua componente fundamental. Sobre a quantização da distorção harmônica, Srivastava et al. (2006) considera que a DHT se aplica a corrente e tensão elétrica, e é definida como o valor de harmônicas *rms* (*root mean square*) dividido pelo valor *rms* da fundamental e, em seguida, multiplicado por 100. A DHT de corrente pode variar de alguns por cento até mais de 100%. Já a DHT de tensão é geralmente inferior a 5%. Os valores de tensão DHTs abaixo de 5% são considerados aceitáveis, mas os valores acima de 10% são definitivamente inaceitáveis e irão causar problemas para equipamentos sensíveis e para as cargas.

Deckmann e Pomilio (2016) complementam que DHT é uma aproximação do valor eficaz normalizado da tensão distorcida, considerando um número finito de harmônicos. Para eles essa constatação permite estabelecer uma maneira de estimar o valor de DHT diretamente no domínio do tempo através do cálculo do valor eficaz do resíduo da tensão após filtrar a componente fundamental.

Para fins de medição a definição mais comum de distorção harmônica é a razão entre as amplitudes *rms* das harmônicas e a amplitude *rms* da onda fundamental, conforme a equação (2.1).

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^n (V_h)^2}}{V_1} \quad (2.1)$$

onde  $V$  é a amplitude de tensão da  $h$ -ésima harmônica. O cálculo para a distorção harmônica total em corrente é análogo.

Outra forma de quantificar as harmônicas é através da Distorção de Demanda Total (DDT), sendo análoga à equação (2.1), porém, ao invés de relacionar as harmônicas com o valor máximo da onda fundamental, como no cálculo da DHT, o DDT é calculado em relação à corrente máxima demandada pela carga tal como na equação (2.2).

$$DDT = \frac{\sqrt{\sum_{h=1}^n (I_h)^2}}{I_M} \quad (2.2)$$

onde  $I_M$  é a máxima corrente demandada pela carga e  $I_h$  é o valor da  $h$ -ésima harmônica. Um valor elevado de  $DDT$  sugere a presença de altas correntes harmônicas no circuito. Haja vista

que a *DDT* relaciona os harmônicos com a corrente máxima este traz uma informação mais precisa quanto a magnitude das distorções.

Para determinar o fluxo de potência do circuito, deve-se conhecer previamente os valores *rms* da tensão e corrente elétrica e, de acordo com Lander (1993), pode-se obter estes valores calculando a raiz do somatório de suas amplitudes ao quadrado, conforme descrito na equação (2.3) e (2.4).

$$V_{rms} = \left( \sum_{i=1}^{\infty} V_{i_{rms}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$I_{rms} = \left( \sum_{i=1}^{\infty} I_{i_{rms}}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.4)$$

onde *i* representa a *i*-ésima harmônica.

O fluxo de potência, em uma determinada seção do circuito, é determinado pelas componentes complexas da tensão e corrente elétrica em cada harmônico, conforme a equação (2.5), onde  $\delta_n$  é o ângulo entre a tensão e a corrente elétrica para a *n*-ésima harmônica e, com esta formulação, pode-se calcular o fluxo de potência produzido por cada harmônico.

Segundo Lander (1993), a potência ativa total é determinada pela soma das potências individuais associadas às harmônicas incluindo a componente média,  $V_0 I_0$ . A direção do fluxo pode ser determinada através do ângulo  $\delta_n$ , podendo ser menor ou maior que  $90^\circ$ .

$$P = V_{n_{rms}} I_{n_{rms}} \cos(\delta_n) \quad (2.5)$$

Outra questão pertinente é que somente é transferida potência ativa para a carga quando a tensão e a corrente possuem termos na mesma frequência. Tal fato pode ser visto na equação (2.5), que trata do fluxo de potência ativa. Notoriamente tem-se que, para haver fluxo de potência, o produto entre a tensão e a corrente da *n*-ésima harmônica, relacionado com o defasamento angular entre elas gera o fluxo de potência ativa.

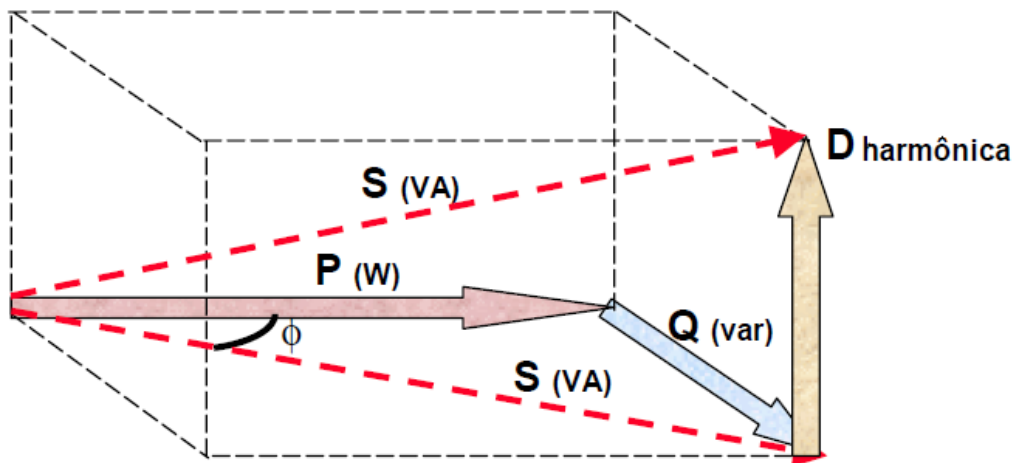
Ainda há a questão do Fator de Potência (FP) que é definido como a razão entre a potência ativa, *P*, e potência aparente, *S*. A equação (2.6) apresenta esta definição que é válida para sistemas com distorções harmônicas.

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt}{V_{rms} I_{rms}} \quad (2.6)$$

Analisando a equação (2.5) e (2.6) nota-se que obtendo um valor próximo a unidade a potência torna-se pouco reativa o que torna o sistema mais eficiente. Quando tem-se um valor baixo de FP é recomendada a correção, normalmente utiliza-se bancos de capacitores para prover os reativos, porém filtros ativos também fornecem esta correção de reativos.

Pode-se demonstrar, através de um tetraedro de potências, a contribuição das correntes harmônicas para o aumento da potência aparente devido à presença de distorções harmônicas no sistema elétrico. Lembrando que a figura é apenas ilustrativa, o vetor das harmônicas dependerá do ângulo e da intensidade delas. A Figura 4 mostra a amplitude das potências em um sistema com harmônicos e evidencia que em um sistema com baixa QEE a circulação de correntes que não geram potência ativa é maior.

Figura 4 - Tetraedro das potências



Fonte: Miguel (2006)

Afim de controlar os níveis de harmônicas no sistema elétrico, são estabelecidas normas reguladoras que informam suas quantidades máxima admissíveis em sistemas e equipamentos. Atualmente não existe no Brasil leis que regulem os níveis de harmônicas introduzidas no sistema, porém a ANEEL (2016), indica no módulo 8 do PRODIST, os valores de referência, como pode ser visto na tabela 4. Em termos de QEE, estes valores servem para referência do planejamento elétrico e, posteriormente ao período experimental de coleta de dados, serão estabelecidos em resolução específica.



Tabela 4 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT <sub>v</sub> ) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 230kV$	3

Fonte: ANEEL (2016)

De acordo com o módulo 8 do PRODIST, da ANEEL (2016), devem ser obedecidos inclusive os valores das distorções harmônicas individuais, conforme indicado na tabela 5.

Tabela 5 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq kV$	$1kV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	<25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	<21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: ANEEL (2016)

Como referência mundial existem dois principais guias internacionais que quantificam e analisam os níveis de harmônicos. Estes são a norma IEC 61000 e o guia *IEEE standard 519 – 1992* que, na prática, são “recomendações” e não um conjunto de pré-requisitos a serem seguidos.

A *IEEE std 519 (1992)* limita a distorção harmônicas de tensão e a corrente no Ponto de Acoplamento Comum (PAC ou em inglês, PCC – *Power Common Coupling*), considerando o usuário final como responsável por assegurar o limite de harmônicas de corrente e as concessionárias de energia como responsáveis pela limitação da distorção da tensão distribuída. Os limites de harmônicos são projetados para toda a instalação visto que o PAC é utilizado como ponto de conexão do fornecedor de energia com o comprador. A Tabela 6 apresenta os limites de distorção de tensão dados por esta normativa.

Tabela 6 – Limites de distorção de tensão

<b>Faixa de tensão</b>	<b>Distorção individual por harmônico (%)</b>	<b>Distorção total de tensão DHT<sub>v</sub> (%)</b>
V ≤ 69kV	3,0	5,0
69kV < V < 161kV	1,5	2,5
V ≥ 161kV	1,0	1,5*

\*Em sistemas de alta tensão, a DHT<sub>v</sub> pode chegar a mais de 2% onde a causa desta distorção é um terminal de alta tensão contínua.

Fonte: IEEE 519 (1992)

De acordo com a *IEEE std 519 (1992)* todos equipamentos de geração de energia estão limitados aos valores de distorção de corrente elétrica citados na Tabela 7, sendo que os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto circuito do PAC.

Notoriamente, de acordo com a Tabela 7, quanto maior a corrente de curto circuito (I<sub>sc</sub>) maiores são as distorções em corrente admissíveis e ao passo em que aumenta-se a tensão de alimentação, reduz-se os limites aceitáveis.

Tabela 7 – Limites de distorção de corrente em relação à corrente fundamental

Nível de tensão	$I_{sc}/I_L$	Harmônicos Individuais					TDD
		$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$h \geq 35$	
$V \leq 69kV$	$< 20$	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
	$20 < 50$	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
	$50 < 100$	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
	$100 < 1000$	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
	$> 1000$	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69kV < V \leq 161kV$	$< 20$	2	1	1,75	0,3	0,15	2,5
	$20 < 50$	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4
	$50 < 100$	5	2,25	2	0,75	0,35	6
	$100 < 1000$	6	2,75	2,5	1	0,5	7,5
	$> 1000$	7,5	3,5	3	1,25	0,7	10
$V > 161kV$	$< 50$	2	1	0,75	0,3	0,15	2,5
	$\geq 50$	3	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Fonte: IEEE 519 (1992)

onde as ordens das harmônicas são representadas por  $h$  e todos equipamentos de geração de energia estão limitados aos valores de distorção de corrente elétrica citados, sendo que os limites diferem de acordo com o nível de tensão e com o nível de curto circuito do PAC. A grandeza TDD (do inglês, *Total Demand Distortion*) é equivalente a Distorção de Demanda Total (DDT).

Com características distintas em relação ao IEEE std. 519, que está concentrada apenas em uma publicação, a norma IEC 61000 é subdividida em várias partes, destacando-se como principais em relação à harmônicas a IEC 61000 parte 3-2 e parte 3-4.

De acordo com Pomílio (2006), a norma IEC 61000-3-2, refere-se às limitações de harmônicas de corrente introduzidas na rede pública de alimentação. Aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16 A por fase, conectados a uma rede pública de baixa tensão alternada, de 50 ou 60 Hz, com tensão fase-neutro entre 220 e 240 V; não tendo sido estabelecidos limites para tensões inferiores. Nessa norma os equipamentos são classificados em quatro categorias:

- a) Classe A: Equipamentos trifásicos equilibrados e todos os demais não incluídos nas classes seguintes;
- b) Classe B: Equipamentos portáteis;
- c) Classe C: Equipamentos de iluminação;

d) Classe D: Equipamentos com corrente de entrada incomum e potência ativa de entrada igual ou inferior a 600 W.

A norma IEC 61000-3-2 estipula limites harmônicos diferentes para cada categoria. Na Tabela 8 são indicados os valores máximos para os harmônicos de corrente, no fio de fase (não no de neutro). Os limites para a classe B são iguais aos da classe A, acrescidos de 50%.

Tabela 8 – Limites para harmônicos de corrente

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente [A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W,<600W) [mA/W]
Harmônicas Ímpares				
3	2,3	3,45	30.FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,115	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$15 \leq n \leq 39$	$0.15 = \frac{15}{n}$	$0.225 = \frac{15}{n}$	3	$3,85/n$
Harmônicos Pares				
2	1,8	1,62	2	
4	0,43	0,645		
6	0,3	0,45		
$8 \leq n \leq 40$	$0.23 = \frac{8}{n}$	$0.35 = \frac{15}{n}$		

Fonte: IEC 61000-3-2 apud Pomílio (2006).

Para equipamentos elétricos ou eletrônicos com corrente de entrada superior a 16A é aplicada a norma IEC 61000-3-4. De acordo com Pomílio (2006), sua tensão de alimentação deve ser menor que 240V para equipamentos monofásicos ou menor que 600V para equipamentos trifásicos. A frequência nominal da rede pode ser 50 Hz ou 60 Hz.

Pomílio (2006) explica que nessa norma são apresentados os limites para distorção harmônica em equipamentos que apresentem potência aparente menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito da instalação. Na tabela 9 podem ser vistos os limites individuais de corrente para cada harmônico que estão normalizados em relação à fundamental.

Tabela 9 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental

Componente Harmônico n	Harmônico Admissível $I_n/I_1, \%$	Componente Harmônico n	Harmônico Admissível $I_n/I_1, \%$
3	21,6	21	$\leq 0,6$
5	10,7	23	0,9
7	7,2	25	0,8
9	3,8	27	$\leq 0,6$
11	3,1	29	0,7
13	2	31	0,7
15	0,7	$\geq 33$	$\leq 0,6$
17	1,2		
19	1,1	Sempre	$\leq 8/n$ ou $\leq 0,6$

Fonte: IEC 61000-3-4 apud Pomílio (2006).

IEC 61000-3-4 apud Pomílio (2006) define os limites para potência de curto-circuito ( $R_{scc}$ ) como o quadrado da tensão nominal dividido pela impedância de curto circuito e que, se o equipamento analisado exceder os limites individuais contidos na tabela 9, pode-se aplicar outro meio de limitação. Caso este seja monofásico o trifásico desbalanceado utilizam-se os limites dados pela tabela 10.

Tabela 10 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental

Mínimo $R_{scc}$	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível $I_n/I_1 \%$					
	THD	PWHD	$I_3$	$I_5$	$I_7$	$I_9$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Fonte: IEC 61000-3-4 apud Pomílio (2006).

Para um circuito trifásico desbalanceado, a corrente de cada fase deve obedecer o limite tabelado e o valor relativo de cada harmônico não deve exceder a limitação de  $16/n\%$ .

Para equipamentos trifásicos equilibrados vale a limitação de  $16/n\%$ , porém utiliza-se a tabela 11 como referência.

Tabela 11 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental

Mínimo R <sub>sce</sub>	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível $I_n/I_1$ %			
	THD	PWHD	$I_5$	$I_7$	$I_{11}$	$I_{13}$
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	40	25	18

Fonte: IEC 61000-3-4 apud Pomílio (2006).

## 2.6 FLUTUAÇÃO DE TENSÃO

Flutuações de tensão são variações da tensão dentro da faixa de 0,95p.u. a 1,05p.u.. Segundo Paulilo (2013) essas flutuações são geralmente causadas por cargas industriais e se apresentam da seguinte forma:

- Flutuações aleatórias: variações sem previsão causadas por fornos a arco, onde as amplitudes das oscilações dependem do estado de fusão do material entre outros;
- Flutuações repetitivas: causadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias;
- Flutuações esporádicas: causadas pela partida de grandes motores sem dispositivo de partida (*soft starter*).

As flutuações causam oscilações de potência e torque em máquinas elétrica, queda no rendimento, cintilação luminosa e interferem nos sistemas de proteção.

## 2.7 VARIAÇÕES NA FREQUÊNCIA

Paulilo (2013) define variações de frequência como sendo um desvio no valor da frequência fundamental do sistema elétrico (60 Hz no Brasil). Tal frequência é regida pela frequência dos geradores de energia que alimentam esse sistema, sendo que apenas pequenas

variações são admitidas e devem-se ao fato de que há um desbalanço dinâmico entre a energia gerada e consumida.

Para a ANEEL(2016) a variação permitida esta compreendida na faixa de  $60 \pm 0,5\text{Hz}$ . Paulilo (20013) cita ainda que variações que ultrapassam tais limites podem ser resultado da saída de um grande bloco de carga ou a perda de uma grande fonte de energia.

### 3. SISTEMAS DE FILTRAGEM

Tendo em vista a familiarização com sistemas usuais de filtragem, este capítulo aborda matematicamente e qualitativamente os filtros passivos. Após são apresentados os filtros ativos, que são adaptativos e podem atenuar uma vasta gama de frequências harmônicas. Por fim, apresenta os filtros híbridos: um composto de filtros passivos e ativos.

Segundo Pires (2010) objetivo de um filtro harmônico consiste em reduzir a amplitude de uma ou mais harmônicas – de tensão e de corrente – em um determinado trecho do sistema. Cita também que os filtros podem ser classificados como em série ou em paralelo (*shunt*) e ainda podem ser classificados como passivos e ativos.

Garcia [21--?] explica que os filtros de harmônicos são capazes de separar sinais elétricos, de corrente e de tensão, alterando suas características: fase e amplitude. Esta separação dos sinais elétricos, filtragem, ocorre devido as características das curvas de impedância dos componentes em relação ao espectro de frequências.

#### 3.1 FILTROS PASSIVOS

De acordo com Pires (2010), filtros passivos são equipamentos compostos basicamente por elementos elétricos passivos tais como indutores, capacitores e resistores. São largamente usados devido à fácil construção e ao baixo custo, quando comparados a sistemas de filtragem ativa.

Ainda de acordo com Pires (2010) há duas configurações possíveis: série e paralelo (*shunt*). Enquanto o filtro série cria um caminho de alta impedância, entre a fonte geradora e a carga, para uma determinada corrente harmônica, o filtro paralelo cria um caminho de baixa impedância em derivação: desviando a corrente harmônica da carga geralmente para o condutor neutro.

Deckmann e Pomilio (2009) complementam que a filtragem passiva utiliza o princípio da ressonância para exercer a função de bloquear ou desviar as correntes harmônicas e evitar a contaminação de outras partes não afetadas pelo distúrbio. Sabe-se que na condição de ressonância série a impedância total vista assume um valor mínimo e, na ressonância paralela, assume um máximo.

Dessa forma, pode-se bloquear a propagação de uma determinada harmônica colocando um filtro com ressonância paralela em série com a fonte harmônica. Analogamente,



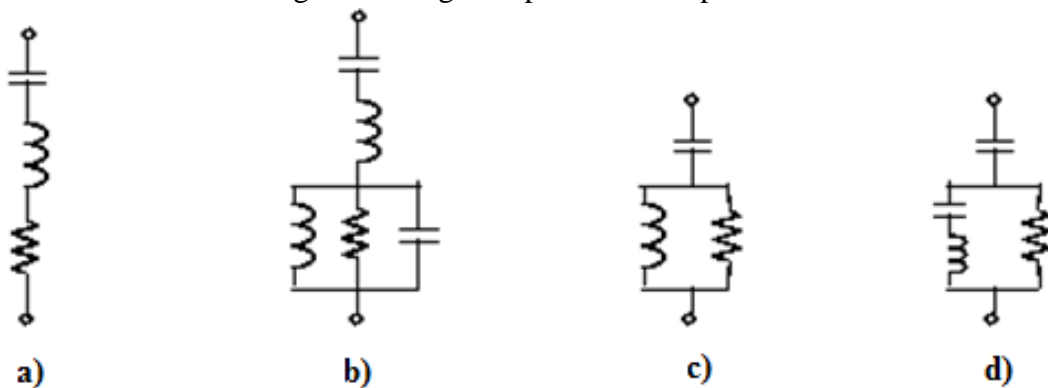
um filtro com ressonância série, conectado em paralelo com a fonte harmônica, permite drenar a respectiva corrente sintonizada para terra, a depender da impedância do restante do circuito.

Halpin e Card (2011) relatam que há filtros de harmônicas de diferentes formas e tamanhos e, geralmente, filtros de harmônicas são paralelos ao sistema de alimentação e proporcionam uma baixa impedância, “caminhos para a terra”, para as correntes de uma ou mais frequências harmônicas. Em aplicações de potência, filtros de derivação são quase sempre mais econômicos do que os filtros da série pelas seguintes razões:

- a) componentes da série deve ser dimensionado para a corrente máxima do sistema, incluindo a componente de frequência de potência. Tal requisição eleva a dimensão dos componentes e, por conseguinte, os custos;
- b) componentes de filtro paralelo são dimensionados pela diferença de tensão do sistema e uma referência (geralmente a terra). Tais condições levam a componente de menor tamanhos e, assim, mais baratos.

Ainda segundo Halpin e Card (2011), os filtros passivos podem ser classificados em três tipos: sintonizado simples, sintonizado múltiplo e amortecido. O filtro sintonizado simples e múltiplo (geralmente duplo) são utilizados para filtrar frequências específicas, haja vista a presença de tal frequência no sistema. Os filtros amortecidos são utilizados para filtrar uma vasta gama de frequências, normalmente é sintonizado em um harmônico de baixa ordem e funcionará como um filtro passa-alta. A Figura 5 sintetiza os três tipos de filtros citados.

Figura 5 – Alguns tipos de filtros passivos



a) sintonizado simples, b) sintonizado duplo, c) amortecido e d) amortecido tipo-C.

Fonte: Mathworks (2016), adaptado

A impedância do filtro sintonizado simples da Figura 5-a varia de acordo com a frequência aplicada nos seus terminais. Uma das formas mais comuns de dimensionar este filtro

é através da sua impedância em função da frequência que, matematicamente, pode ser visto na equação (3.1).

$$Z(\omega) = \left( R + j\omega L + \frac{1}{j\omega C} \right) \quad (3.1)$$

onde  $\omega$  é a frequência angular [Hz],  $Z(\omega)$  é a impedância em função da frequência [ $\Omega$ ],  $C$  é a capacitância do filtro [F],  $L$  a indutância do filtro [H] e  $j$  denota o número imaginário [ $\sqrt{-1}$ ]

Outra forma é calcular a impedância do filtro explicitando a frequência de sintonia, tal como descrito pelo sítio da Mathworks (2016). A equação (3.2) representa a impedância do filtro sintonizado simples.

$$Z_n = \left( R + j\left(n X_L - \frac{X_c}{n}\right) \right) \quad (3.2)$$

onde  $n$ ,  $X_L$  e  $X_c$  representam a  $n$ -ésima harmônica, a reatância indutiva na frequência fundamental  $\frac{1}{c\omega}$  e a reatância capacitiva na frequência fundamental  $L\omega$ , respectivamente.

Para o este circuito entrar em ressonância, a impedância deve ser a mínima e portanto a ordem harmônica,  $n$ , pode ser expressa tal como visto na equação (3.3). Uma representação da impedância em função da frequência de um filtro sintonizado simples pode ser vista na Figura 6.

$$n = \frac{f_n}{f_1} = \sqrt{\left(\frac{X_c}{X_L}\right)} \quad (3.3)$$

sendo  $f_1$  a frequência fundamental e  $f_n$  a frequência de sintonia.

No dimensionamento de filtros passivos é importante salientar, também, o Fator de Qualidade (Q), que, segundo Mouco (2011) é a razão entre a quantidade de energia armazenada e a quantidade de energia perdida em um ciclo de sua frequência ressonante.

De acordo com Pires (2010) o filtro sintonizado tem um fator de qualidade elevado, entre 30 e 80, já para Mouco (2011) o valor é de 20 a 100. Para a obtenção de valores elevados de Q é necessária a redução da resistência elétrica tanto quanto fisicamente possível. A definição de Q pode ser vista na Equação (3.4).

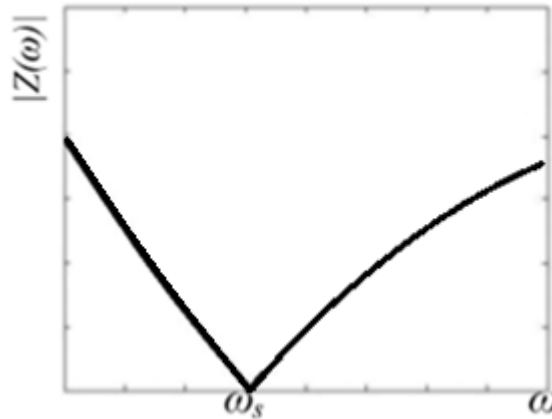
$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{n X_L}{R} = \frac{X_c}{n R} \quad (3.4)$$

O fator de qualidade do filtro pode ser ajustado para atuar na atenuação de uma faixa de frequências, para tal, deve-se reduzir o fator de qualidade de forma a aumentar a largura da banda formada em torno do pico na frequência de ressonância, tal efeito pode ser visto na equação (3.5) fator de qualidade e a dependência da largura de banda. Entretanto como citado

anteriormente, o fator de qualidade dos filtros para mitigar harmônicos de baixa ordem é alto, logo a largura de banda é baixa.

$$Q = \frac{\omega_c}{\Delta \omega_c} \quad (3.5)$$

Figura 6 – Impedância de um filtro sintonizado em função da frequência



Fonte: O próprio autor

O filtro sintonizado duplo (Figura 5-b), de acordo com o sítio Mathworks (2016), desempenha o mesmo papel que dois filtros sintonizados simples, porém com algumas vantagens: suas perdas são mais baixas que dois filtros sintonizados simples e a impedância entre as duas frequências de sintonia é menor.

Arrilaga e Watson (2003) também citam a equivalência com dois filtros sintonizados simples, Figura 7, porém descreve que tal funcionamento se deve a algumas relações entre seus componentes, conforme as equações (3.6), (3.7), (3.8), (3.9) e (3.10).

$$C_1 = C_a + C_b \quad (3.6)$$

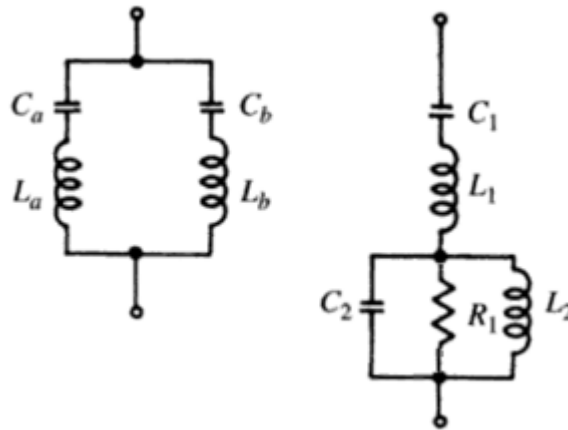
$$C_2 = \frac{C_a C_b (C_a + C_b) (L_a + L_b)^2}{(L_a C_a - L_b C_b)^2} \quad (3.7)$$

$$L_1 = \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (3.8)$$

$$L_2 = \frac{(L_a C_a - L_b C_b)^2}{(C_a + C_b)^2 (L_a + L_b)} \quad (3.9)$$

$$R_1 = \frac{1}{2} (n_a + n_b) X_{L_2} Q \quad (3.10)$$

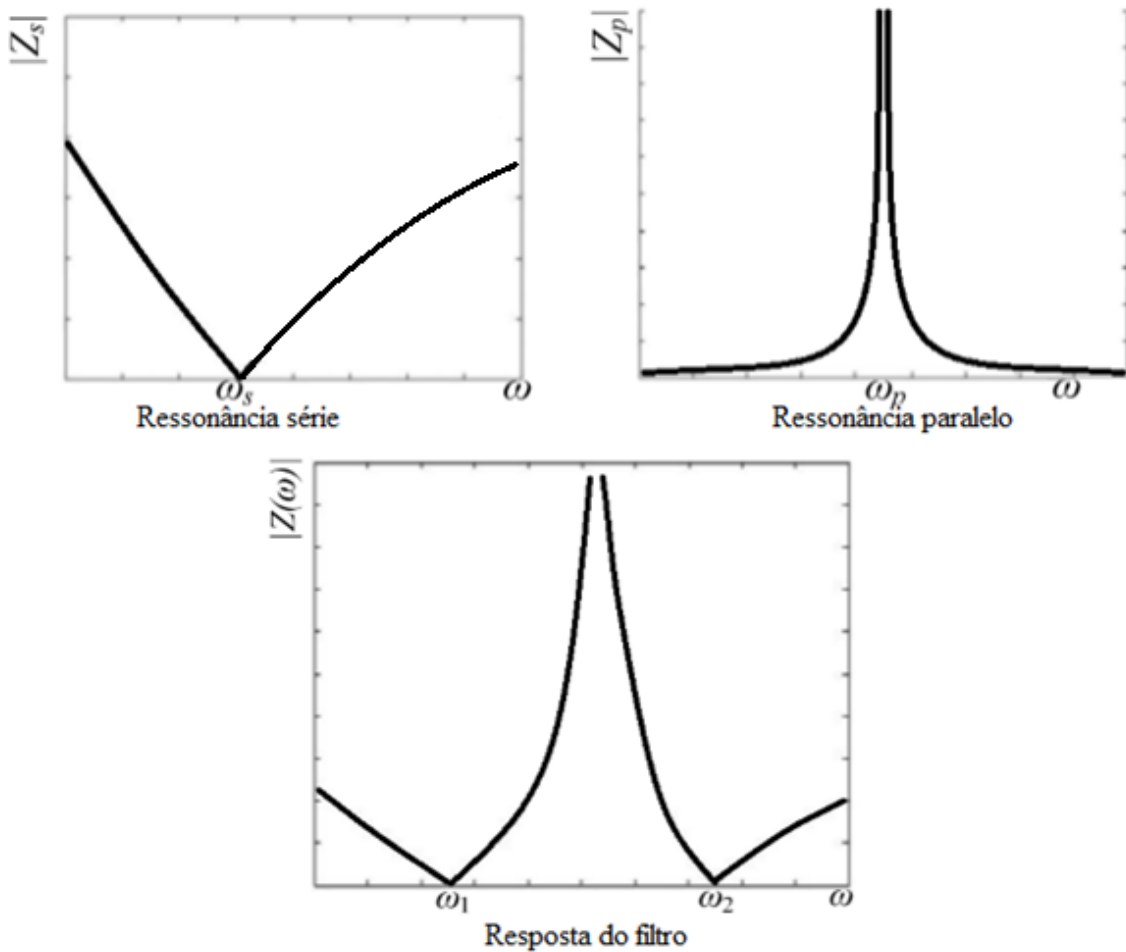
Figura 7 - Equivalência filtro sintonizado simples e duplo



Fonte: Arrilaga e Watson (2003), adaptado

Representativamente a curva característica da impedância em função da frequência do filtro sintonizado duplo pode ser visto na Figura 8, juntamente com as respostas individuais da ligação LC série e paralelo que compõem o filtro.

Figura 8 - Curva característica da impedância em função da frequência



Fonte: O próprio autor

Os filtros sintonizados, quando em paralelo com o sistema, funcionam como um filtro rejeita banda, desviando para terra as correntes cujas frequências estiverem próximas a sua frequência de ressonância. Quando em ressonância o circuito LC apresentará baixa impedância, e, portanto, comportar-se-á como um curto circuito.

Nas baixas frequências o indutor apresentará baixa reatância, comportando-se como uma pequena resistência, entretanto o capacitor apresentará alta reatância: circuito aberto. Já para sinais de alta frequência as altas derivadas de corrente farão com que o indutor apresente alta reatância ao passo que o capacitor se comporta como um curto circuito.

Para a ligação LC paralelo da Figura 5-b, o comportamento é inverso ao da ligação série, ou seja, quando em ressonância apresenta alta impedância comportando-se como um circuito aberto. Para frequências distantes da sua sintonia a resistência diminui, tendendo a zero e a impedância da ligação para terra fica apenas com o valor da resistência que é ligada em paralelo.

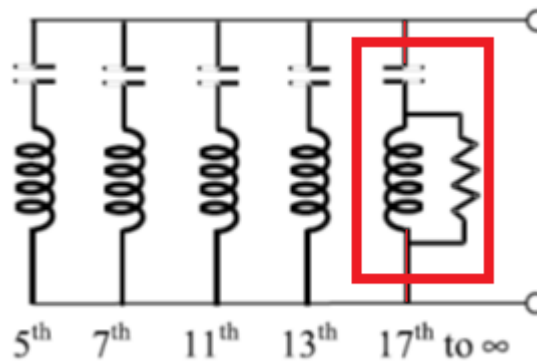
Outra questão pertinente é a de que a frequência de sintonia em projetos práticos deve considerar as reatâncias do sistema que compõe a ligação. Portanto, para fins de projeto deve-se analisar as impedâncias da rede de alimentação e das cargas não lineares a fim de dimensionar corretamente o filtro passivo. Os cálculos apresentados anteriormente consideram que a impedância da fonte de alimentação é desprezível e que a impedância da carga é infinita, simplificando, assim, a demonstração.

Notavelmente, para a redução de múltiplos harmônicos é possível uma conexão em paralelo de um conjunto de filtros passivos (formando um banco de filtros), de forma que cada filtro seja sintonizado de forma a capturar uma determinada frequência harmônica – pode-se, também, adicionar um filtro passa altas para atenuar as frequências elevadas. A Figura 9 representa um arranjo de filtros passivos (LC) sintonizados, cada um em uma frequência.

Halpin e Card (2011) citam que é comum ajustar bancos de filtros individuais sintonizados a ligeiramente abaixo (tipicamente cerca de 5%) a frequência de sintonia.

- a) quando sintonizado exatamente na frequência de ressonância a resistência do filtro é tão baixa que pode sobrecarregar o filtro pois toda corrente harmônica será drenada por ele;
- b) os componentes elétricos possuem coeficientes de temperatura diferentes e os capacitores são mais sensíveis nesta configuração. A maioria dos capacitores tem coeficiente negativo (a capacitância decai ao passo que a frequência de sintonia aumenta com a temperatura) e deseja-se que a sintonia esteja um pouco abaixo da frequência que se deseja filtrar.

Figura 9 – Banco de filtro sintonizados



Fonte: Halpin e Card (2011)

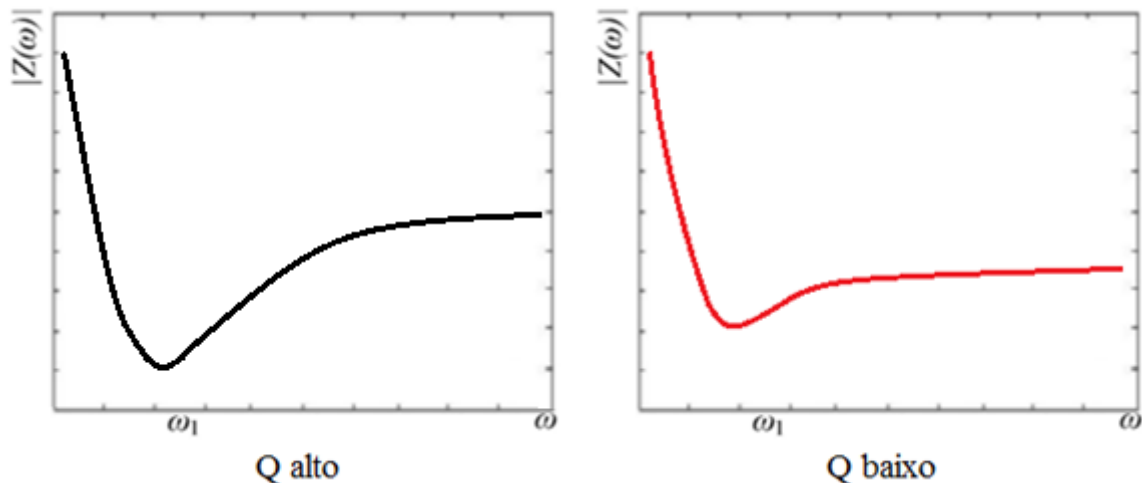
O ramo destacado na Figura 9 é um filtro passa altas, o mesmo apresentado na Figura 5-c, sendo um filtro de segunda ordem com impedância descrita pela equação (3.11) e o fator de qualidade do filtro RL paralelo, segundo o sítio da Mathworks (2016), é dado pela equação (3.12).

$$Z = \frac{(R(jX_L n))}{R + jX_L n} - \frac{jX_C}{n} \quad (3.11)$$

$$Q = \frac{R}{n X_L} \quad (3.12)$$

Nestes filtros deseja-se que a impedâncias seja baixa para altas frequências, logo o fator de qualidade deste filtro não deve ser alto (alto fator de qualidade estreita a largura de banda), pois a impedância voltaria a crescer em altas frequências. A Figura 10 é uma representação do filtro amortecido em questão.

Figura 10 - Impedância do filtro passa alta



Fonte: O próprio autor

A resposta do filtro da Figura 5-d é muito semelhante à do filtro da Figura 5-c, porém, segundo Klempka, Hanzelka e Varetsky (2013) a principal vantagem deste filtro é que o ramo série LC do braço inferior pode ser sintonizado na frequência fundamental, comportando-se como um curto circuito. Assim, o filtro funciona como um compensador de reativos capacitivo próximo a frequência fundamental.

Finalmente, tem-se que, filtros passivos são projetados de forma a impedir a circulação de uma corrente harmônica, quando em série, ou para criar um caminho de baixa impedância para o condutor neutro; quando em paralelo. O filtro passivo cumpre as especificações para qual é projetado, mas, atualmente, a dinâmica na ordem dos harmônicos torna inviável a construção de um banco de filtros passivos para eliminar múltiplas frequências. Para tal há no mercado filtros ativos, os quais funcionam como fonte de corrente controlada, objetivando a compensação das componentes harmônicas demandada pela carga.

### 3.2 FILTROS ATIVOS

O aumento da poluição harmônica em sistemas elétricos provoca o interesse de engenheiros eletricitas no desenvolvimento de soluções dinâmicas e adaptativas para solucionar os problemas de qualidade de energia. Uma opção, nesses casos, é a utilização de filtros ativos de potência.

Wong, Dai e Lam (2016) afirmam que o filtro ativo tem se tornado um dos mais populares compensadores de desvio da qualidade de energia, compensando tanto a harmônica quanto a corrente reativa simultaneamente. Além disso, a operação de carga múltipla com um filtro ativo é tecnicamente e economicamente viável.

De acordo com Deckmann e Pomilio (2009), os filtros ativos são projetados para absorver as componentes de interesse, geradas pelas cargas não lineares, e devem ter uma resposta rápida e adaptativa: logo, fazem uso de controle eletrônico de potência.

Filtros ativos, segundo Dugan et al. (2004), são dispositivos relativamente novos, usados para eliminar harmônicos. Eles são baseados numa sofisticada eletrônica de potência e são muito mais caros do que os filtros passivos. No entanto, eles têm a vantagem de não ressoar com o sistema.

Para Baggini (2007) o conceito do Filtro Ativo é simples: a eletrônica de potência é utilizada para gerar as correntes harmônicas não-lineares exigidas pelas cargas de modo que a fonte forneça apenas a corrente fundamental. A corrente da carga é medida por um

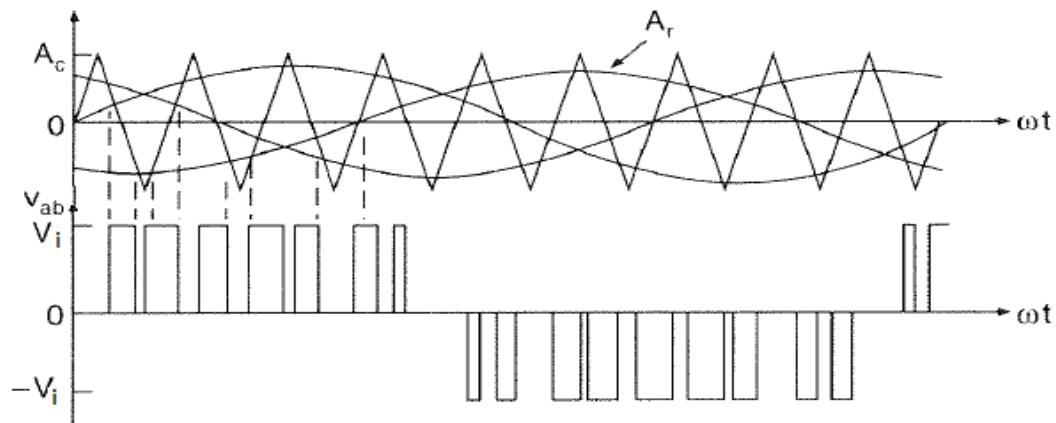
transformador de corrente, sendo analisada por um DSP (do inglês *Digital Signal Processor*) para determinar o perfil harmônico. Esta informação é usada pelo gerador de corrente para produzir exatamente a corrente harmônica requerida pela carga.

Para a realização de um filtro ativo, segundo Deckmann e Pomilio (2009), utiliza-se a capacidade de um conversor CC-CA para produzir uma tensão ou corrente elétrica com uma onda qualquer. A função dos inversores é a de produzir uma onda com o intuito de compensar a componente que causa distorção na carga. Ainda segundo eles, são possíveis a implementação do filtro ativo série (FAS) ou do filtro ativo em derivação ou paralelo (FAP).

Ribeiro (2003) menciona que há dois tipos de conversores aplicáveis no desenvolvimento de filtros ativos: o inversor de corrente (CSI, do inglês *current source inverter*) e o inversor de tensão (VSI, do inglês *voltage source inverter*). A operação do CSI utiliza um indutor em seu lado CC e faz com que ele assuma uma corrente não senoidal para compensar as harmônicas geradas pela carga não linear. Já o VSI conta com um ou mais capacitores no seu lado CC: sendo que esta versão tornou-se dominante por apresentar menor tamanho e custo.

Para concepção dos filtros ativos são utilizadas técnicas de modulação PWM para gerar a onda de referência na saída do filtro. Normalmente utiliza-se uma modulação SPWM, dado que tipo de modulação apresenta na saída uma tensão que, se filtrado o conteúdo de alta frequência, apresenta uma forma muito próxima à senóide esperada. A Figura 11 representa uma modulação SPWM para uma onda senoidal.

Figura 11 - SPWM



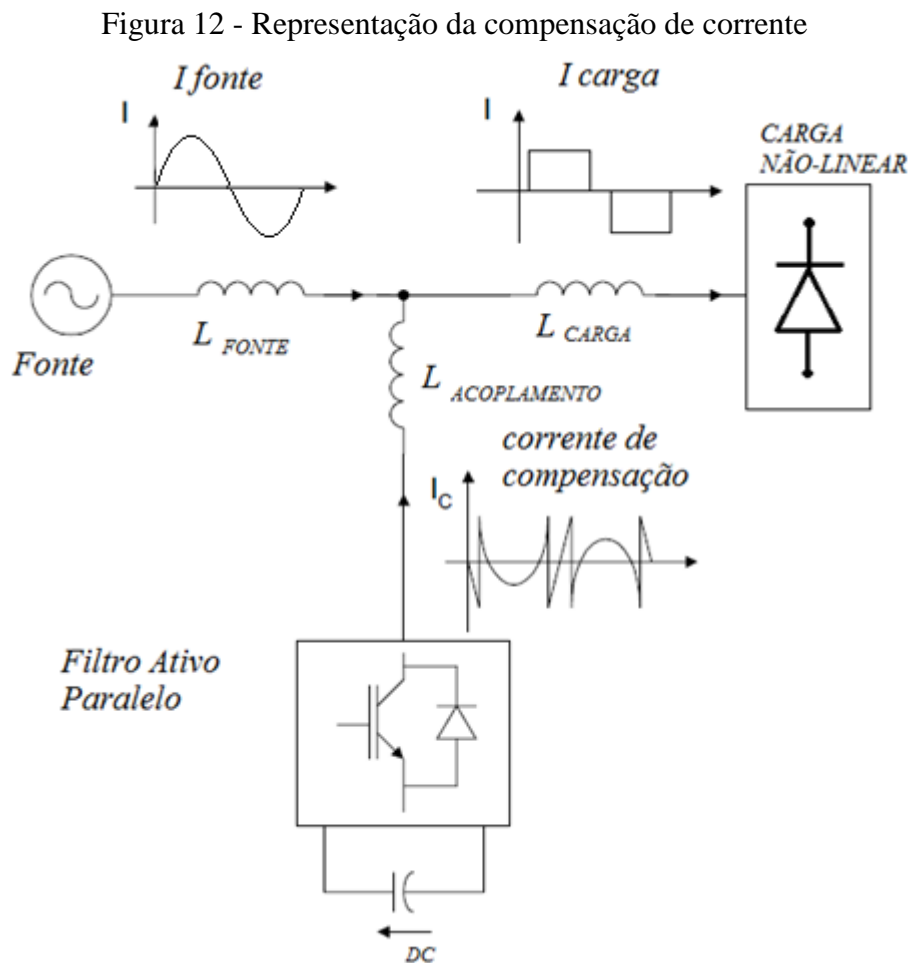
Fonte: Rashid

Simplificadamente, o filtro gera um sinal de corrente que é igual a diferença entre a corrente harmônica da carga e a fundamental defasado de  $180^\circ$ , sendo esta injetada na carga de forma a manter a corrente fundamental na fonte. Ou seja, o filtro provê toda corrente harmônica solicitada pela carga.



Segundo Deckmann e Pomilio (2009) a utilização filtros em derivação não muda a corrente na carga, dado que o filtro praticamente não modifica a tensão no PAC e ainda permite suprir à carga toda a potência reativa, incluindo os componentes harmônicos. Com isso, consome-se da rede apenas a corrente que gera potência ativa, implicando em um valor mínimo de corrente fornecido pelo sistema mantida a potência ativa da carga.

Ou seja, a corrente demandada pelo conjunto carga e filtro formam a mesma corrente demandada por uma resistência pura, minimizando as correntes reativa e, assim, maximizando o fator de potência. A Figura 12 representa uma possível compensação de corrente em um FAP.



Fonte: Mórán e Dixon (2001), adaptado.

Na Figura 12 fica evidente que a corrente de compensação ora drena corrente da fonte e ora entrega corrente para a carga e como resultado a componente harmônica contida na carga é cancelada com a produzida pelo filtro. Assim, para a fonte do sistema de potência, a carga não linear é vista como um resistor ideal.

Para Azevedo (2011) os filtros ativos também são utilizados para melhorar o FP e desbalanço de corrente. Neste caso o filtro injeta, além da corrente harmônica, uma corrente extra capaz de eliminar a defasagem entre a tensão e a corrente: fazendo com que a fonte veja a carga como uma resistência pura e balanceada.

Sobre as vantagens dos FAPs Azevedo apud Omori (2011) complementa com alguns aspectos positivos dessa configuração:

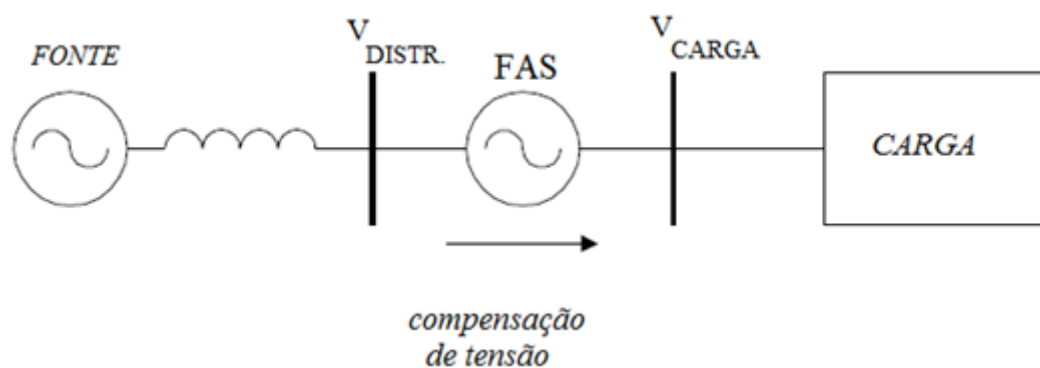
- a) FAPs não alteram de forma significativa as correntes nas cargas, visto que não alteram a tensão elétrica no PAC;
- b) a ação do filtro permite suprir toda potência não ativa à carga;
- c) maximiza o fator de potência no sistema elétrico, drenando o mínimo de corrente da fonte (a fonte “enxerga” a carga como uma resistência pura,  $FP=1$ );
- d) a sua instalação paralelamente ao sistema não interfere na sua operação, em caso de defeitos no filtro ele pode ser removido sem interrupção no fornecimento de energia.

Analisando o que foi citado sobre FAPs, nota-se que este tipo de filtro ativo tem a capacidade de compensar principalmente harmônicos de corrente, mas não os de tensão. Para tal é possível utilizar um filtro ativo série que, segundo Singh, Chandra e Al-Haddad (2015), servem principalmente para proteger as cargas que são sensíveis à variações de tensão elétrica, tais como afundamento de tensão (*sag*), flutuação de tensão (*flicker*), elevação de tensão (*swell*) e desbalanço.

Entretanto, por se ligado em série ao sistema elétrico os FASs necessitam de maior cuidado para sua implementação, Singh, Chandra e Al-Haddad (2015) explicam também que esta configuração é suscetível a danos quando submetidos a curto circuito, requerendo, assim, uma proteção adequada uma vez que a corrente que circula pelo filtro série é a própria corrente do sistema.

Móran e Dixon (2001) complementam que para funcionar como isolador de harmônicas um filtro LC precisa ser conectado entre a carga não linear e o acoplamento do FAS (caracterizando-o como filtro híbrido). Porém, ainda segundo os autores, o FAS sem o filtro passivo paralelo LC só poderia melhorar a qualidade da tensão elétrica, funcionando como um compensador de tensão, tal como citado por Singh, Chandra e Al-Haddad (2015). A Figura 13 apresenta o filtro ativo série como compensador de tensão.

Figura 13 - FAS como compensador de tensão



Fonte: Mórán e Dixon (2001), adaptado.

A estrutura mais amplamente utilizada em instalações de baixa tensão é o filtro ativo paralelo que, aliado a alguns fatores com performance, adaptabilidade de carga e tamanho físico são vantajosos quando comparados aos seus antepassados passivos, baseados nos circuitos descritos no subcapítulo 3.1. Outra vantagem é que filtros ativos permitem não só uma compensação de harmônicos, mas também do fator de potência de deslocamento (FPD) e do desequilíbrio de carga. Entretanto cada caso deve ser avaliado de modo a reduzir custos e restrições de projeto.

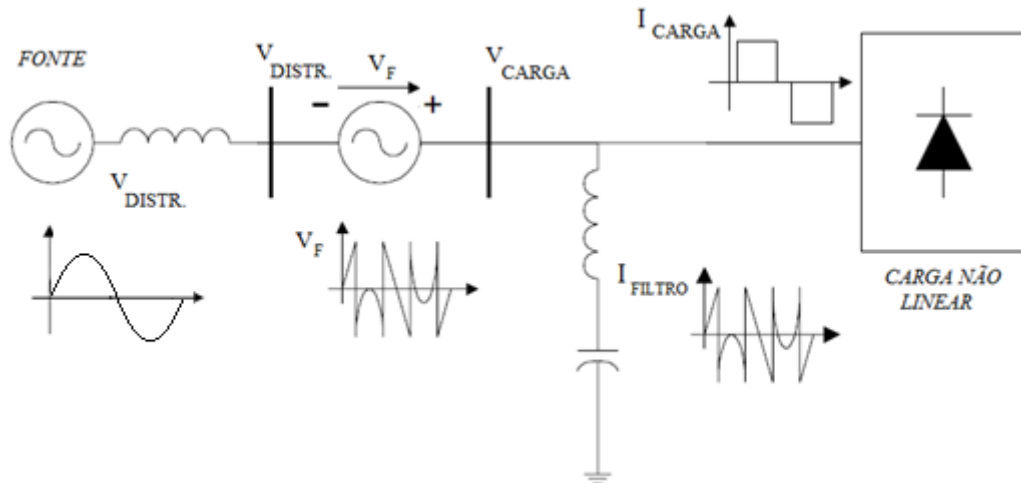
### 3.3 FILTROS HÍBRIDOS

Topologias híbridas para filtros ativos consistem da junção de filtros ativos e filtros passivos em diferentes configurações. Essa junção promoveu uma melhora nas características de compensação do filtro passivo ao passo que a potência do filtro ativo também pode ser reduzida, haja vista que o filtro passivo tem alta impedância para a frequência natural.

Para Ribeiro (2003) os filtros híbridos são uma combinação de filtros ativos e passivos sendo uma opção alternativa na abordagem corretiva e, apesar dos filtros ativos serem melhores do que os passivos em alguns pontos, eles apresentam desvantagens, as quais podem ser superadas fazendo o uso do filtro híbrido. A combinação de filtros passivos e ativos apresentam melhores características do que apresentariam com o uso isoladamente e ainda é possível uma combinação do filtro ativo paralelo e série conhecida como filtro ativo universal.

Conforme visto no subcapítulo 3.2, o filtro ativo série não compensa correntes harmônicas, porém em uma topologia híbrida com um circuito LC paralelo, conforme a Figura 14, pode-se obter tal compensação.

Figura 14 - FAS compensador de correntes harmônicas



Fonte: Mórán e Dixon (2001), adaptado.

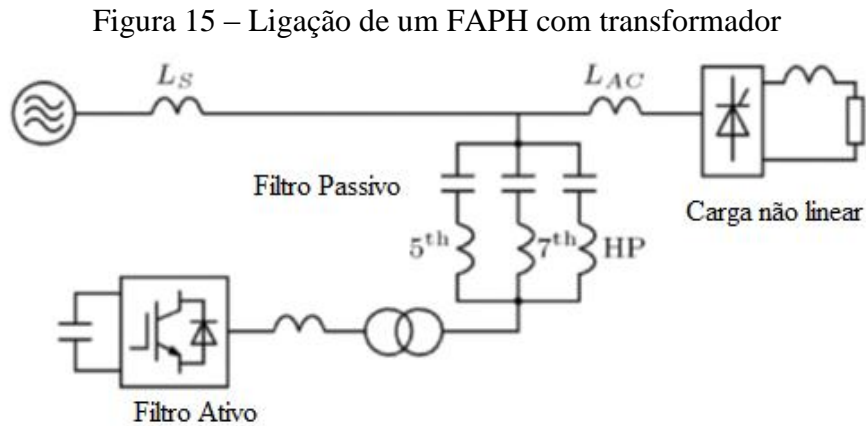
Akagi (2005) relata que recentemente a atenção tem sido dada aos filtros ativos híbridos com inversores que utilizam PWM (do inglês, *Pulse Width Modulation*) baseado em fonte de tensão sendo que esses filtros são mais atrativos para filtrar harmônicas, tanto em filtragem quanto em custo, quando comparados aos filtros passivos. Ele complementa que isso é mais especificamente para sistemas de alta potência.

Cheng, Bhattacharya e Divan (1996) citam que, dos resultados principais das topologias de filtros ativos híbridos, o desenvolvimento de filtros ativos nominalmente pequenos em relação ao sistema em que é implementado (<5%) quando comparado ao filtro ativo puro. Comenta que os filtros híbridos melhoram a capacidade de filtragem dos passivos puros e reduzem a potência nominal do filtro ativo além de oferecer recursos como a regulação de tensão de linha e compensação reativa.

De acordo com Lamich et al. (2006) um ponto importante a considerar na concepção de filtros ativo paralelo é o seu acoplamento ao sistema elétrico. Desde as primeiras aplicações de FAPs no sistema de baixa tensão, a estrutura consiste em um inversor de fonte de tensão (VSI) acoplado a rede por meio de um indutor. Tal fato traz um inconveniente: a tensão do barramento CC deve ser significativamente maior que o valor de pico de tensão da rede para que tenha capacidade de injetar corrente no sistema. Usualmente a tensão do barramento CC deve ser da ordem de 750V para uma alimentação de 400V.

Akagi (2005) uma combinação com o filtro passivo, tal como na Figura 15, torna possível uma grande redução na classificação do filtro ativo, haja vista que a operação do filtro não trata de compensar diretamente as correntes harmônicas da carga, mas sim modificar a impedância de forma a otimizar o desempenho de filtragem do filtro passivo quando utilizado

sozinho. Ele complementa que estes filtros, apesar de fornecerem soluções viáveis e eficazes em alta potência, são pouco utilizados dada a necessidade de um transformador e a complexidade do filtro passivo.



Fonte: Akagi (2005), adaptado.

### 3.4 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA FILTROS ATIVOS

A estratégia de controle é uma questão de grande relevância quando se trata de filtros ativos. Ela define a forma com que será obtida a onda fundamental do sistema, a detecção da harmônica a ser filtrada, o tipo de inversor utilizado, o tipo de gatilhamento dos IGBTs, entre outros.

Como há muitas variantes de filtro ativo proposto e as topologias podem levar a infinitos métodos de controle – dado que a possibilidade de ligações também é infinita – é importante um estudo para utilizar uma metodologia de controle que seja confiável na estrutura em que será implementada. Um erro comum seria utilizar um filtro paralelo com um controle de corrente com intento de mitigar harmônicos de tensão; para tal seria necessário um filtro série com uma estratégia de controle específica.

O desempenho de um filtro ativo, segundo Bangia et al. (2013), depende de como é feito o cálculo do sinal de referência para compensação e que entre as muitas estratégias de controle mencionados para estimar a corrente de referência a teoria de potência instantânea e a teoria da referência síncrona são as mais utilizadas. Citam que o método consiste em subtrair a componente fundamental de corrente com sequência positiva da corrente de carga e são largamente utilizadas por serem simples e de fácil implementação.

Um aspecto crucial, segundo Ribeiro (2003), é técnica de controle dos filtros ativos e é implementada em três estágios. De acordo com ele, no primeiro estágio, os sinais de tensões,

correntes são amostrados e isolados, ou seja, este primeiro estágio é um condicionador de sinais. No estágio seguinte, os sinais são processados com base no controle adotado e na configuração física do filtro e, finalmente, no último estágio, acontece a geração de sinais para gatilhamento dos elementos do filtro ativo. Ribeiro (2003) descreve ainda que as estratégias de modulação utilizadas no terceiro estágio como: modulação por largura de pulso (PWM), por controle de histerese, de modos deslizantes ou ainda por uma lógica difusa.

Para Zaveri e Chudasama (2009) uma das mais importantes características do controle do filtro ativo é a geração da referência. Eles citam os quatro métodos mais comuns de geração de referência com sendo: Teoria da Potência Instantânea (PQ), Teoria da Referência Síncrona (SRF, do inglês, *Synchronous Reference Frame*), SRF modificado e Teoria de detecção de corrente contínua.

Entre os vários métodos apresentados na literatura, o método mais popular é o SRF e, de acordo Zaveri e Chudasama (2009), é provável que seja o melhor método (Tabela 12). Eles descrevem que o método usa uma transformação d-q (direto-quadratura) para transformar os sinais de carga em um vetor girante e que as componentes fundamentais da corrente, em quantidade d-q, transformam-se em valores CC. Assim a isolação dos componentes harmônicos, no referencial d-q, é obtida usando um filtro passa-altas.

Apesar da vantagem deste método utilizar apenas os sinais de corrente para gerar o referencial, diferentemente da Teoria de Potência Instantânea, o uso de um sistema de sincronização é necessário e fazendo uso de um elo travado em fase (PLL, do inglês *phase-locked loop*) o sinal de tensão também deve ser medido.

Tabela 12– Respostas dos métodos de controle

Parâmetros	Teoria da Potência Instantânea (PQ)	Teoria d-q	Teoria da Referência Síncrona (SRF)	Teoria de detecção de corrente contínua
Tempo de resposta	50ms	10ms	10ms	30ms
Resposta da mudança de carga	Lenta	Rápida	Rápida	Melhor
Precisa de filtro de <i>Ripple</i>	Sim	Sim	Não	Sim

Fonte: Zaveri e Chudasama (2009), adaptado.

## 4. ESTUDO DO FILTRO HÍBRIDO PARALELO SEM TRANSFORMADOR

Continuando a evolução dos filtros ativos, os filtros híbridos aproveitam o que há de melhor nas soluções passivas e ativas: aplicando o melhor rendimento de cada uma delas. Os filtros híbridos *shunt* tiveram uma evolução importante para média potência nas últimas décadas: o acoplamento do filtro ativo com a rede por meio do filtro passivo LC com a remoção do transformador.

Tal ligação pode ser feita ao barramento CA por meio de um ou mais circuitos LC série, permitindo o uso de uma tensão reduzida no filtro ativo. Isto ocorre porque o capacitor, tem a capacidade de bloquear a tensão alternada da rede no qual é ligado para baixas frequências, como a de 60Hz.

### 4.1 DESCRIÇÃO E FUNCIONAMENTO DO FILTRO

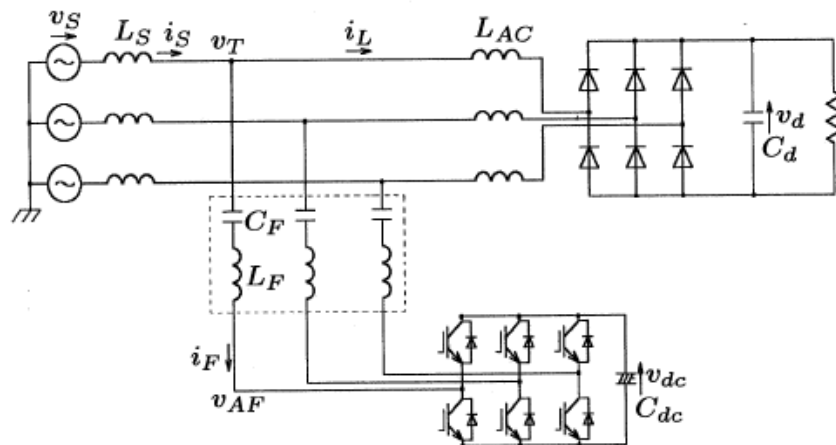
O filtro híbrido sem transformador é conectado em paralelo a carga não linear e o filtro passivo sintonizado em uma frequência harmônica de valor relevante. Tal configuração utiliza o método de variação de impedância, gerando uma tensão na saída do filtro ativo de acordo com as correntes harmônicas solicitadas pela fonte. O que faz com que a impedância aparente do filtro passivo se altere conforme a necessidade e limitações de projeto.

A Figura 16 representa o sistema proposto, que consiste em um filtro ativo de 2,0kVA com frequência de chaveamento de 10kHz (SPWM), em série com um filtro passivo de 5kVA, e o sistema é ligado em paralelo diretamente no barramento, sem transformador. Neste barramento é conectada a fonte e um retificador trifásico com potência nominal de 20kW.

De acordo com Srianthumrong e Akagi (2003) a indutância da carga,  $L_{AC}$ , dever ser muito maior do que a indutância da fonte de alimentação,  $L_S$ , objetivando conter a falha de corrente do retificador e/ou da carga CC. Isto se explica porque o retificador atua como fonte de corrente visto do PAC e o indutor  $L_{AC}$  é indispensável, visto que não há nenhum indutor no lado CC do retificador.

Para tal foi selecionado  $L_{AC} = 3mH$  (7,8%), considerando a impedância da fonte como  $L_S = 100uH$  (0,5%). Em cada fase há um filtro passivo paralelo sintonizado na sétima harmônica (420Hz), ou seja, o filtro passivo apresenta uma baixa impedância no entorno desta frequência e, de acordo com Akagi (2005), não é necessário um filtro para eliminar a frequência de comutação, haja vista a alta impedância do filtro LC na frequência de chaveamento (10kHz).

Figura 16 - Circuito completo



Fonte: Srianthumrong e Akagi (2003)

A função do filtro passivo, além de absorver as harmônicas da ordem na qual foi sintonizada, é a de reduzir a tensão elétrica em cima do filtro ativo: isso se deve ao fato da impedância do capacitor,  $C_F = 100\mu F$  (50%), na frequência fundamental.

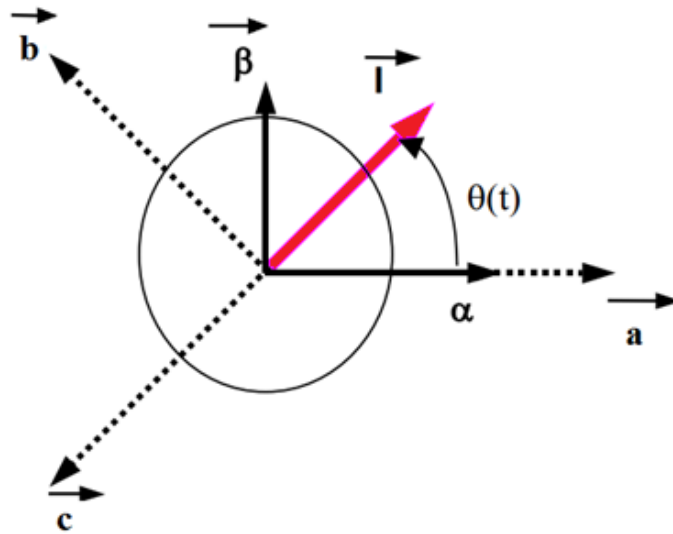
#### 4.2 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

O método SRF é utilizado para calcular as harmônicas do sistema. As três fases do sistema são transformadas em um plano que rotacional na frequência fundamental quando aplicada as transformações de Clarke e de Park.

Nesta transformação as correntes de um sistema trifásico a três fios podem ser associadas a um vetor espacial  $\vec{I}$  no plano  $\alpha$ - $\beta$ , e, de acordo com Cutri (2004) apud Ferrero et al (1993), o vetor  $\vec{I}$  pode ser representado por combinações lineares dos vetores de tensão  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  ou pelos vetores  $\vec{\alpha}$ ,  $\vec{\beta}$ .

A Figura 17 representa o plano  $\alpha$ - $\beta$  e demonstra também que os vetores  $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$  são combinações dos vetores  $\vec{\alpha}$  e  $\vec{\beta}$ , logo, não formam uma base.



Figura 17 - Sistema de coordenadas a-b-c e  $\alpha$ - $\beta$ 

Fonte: Cutri (2004), adaptado.

A combinação dos vetores pode ser vista matematicamente pela equação (4.1) e a equação (4.2) representa a rotação, na frequência fundamental ( $\omega_1$ ), deste vetor.

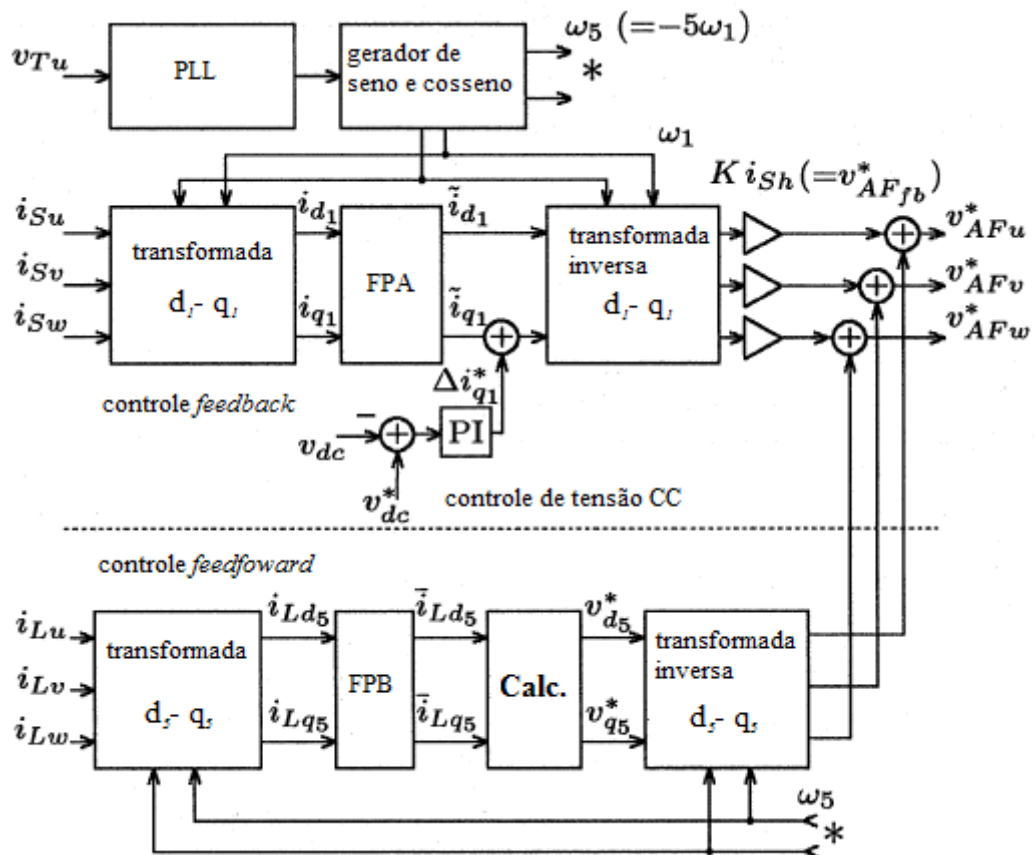
$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & -\text{sen}(\omega_1 t) \\ \text{sin}(\omega_1 t) & \text{cos}(\omega_1 t) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

onde  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  são as correntes de cada fase.  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  são as bases para a transformação e  $i_D$  e  $i_Q$  são as corrente no novo sistema de coordenadas.

Depois da transformação, já no sistema d-q, as componentes da frequência fundamental ( $\omega_1$ ),  $i_{su}$ ,  $i_{sv}$  e  $i_{sw}$  são transformados em quantidades contínuas –  $i_{d1}$  e  $i_{q1}$  – ao passo que as harmônicas são quantidades oscilantes. As componentes oscilantes são extraídas através de um filtro passa-altas (PA) com uma frequência de corte de 20Hz, e a transformada inversa produz as correntes harmônicas da fonte que são multiplicadas por um ganho  $K$  gerando, assim, uma tensão de referência para o controle. Esta etapa corresponde ao *Feedback Control* da Figura 18.

Figura 18 - Diagrama de blocos do controlador



Fonte: Srianthumrong e Akagi (2003), adaptado.

Para melhorar o controle dos harmônicos de quinta ordem, foi aplicado o método de controle utilizado por Srianthumrong e Akagi. (2003). Esta técnica consiste em introduzir uma malha de controle específica com o objetivo de que toda a corrente de quinta ordem harmônica seja absorvida pelo filtro LC, melhorando a performance (do mesmo, do filtro como um todo ou do resultado como um todo). Porém, para a implementação deste método são necessários gastos com a instalação e mais sensores são utilizados.

Tal controle avalia as tensões e correntes de quinta harmônica no sistema de referência síncrona com a rotação cinco vezes maior do que a da frequência natural. Elas podem ser calculadas por meio da referência estacionária  $\alpha$ - $\beta$  conforme as equações (4.3) e (4.4).

$$V_{dq5} = V_{\alpha\beta} e^{-j\omega_5 t} \quad (4.3)$$

$$i_{dq5} = i_{\alpha\beta} e^{-j\omega_5 t} \quad (4.4)$$

onde  $\omega_5$  representa a quinta harmônica e  $j$  corresponde ao número imaginário  $\sqrt{-1}$ . As relações entre as componentes complexas e vetoriais são descritas pelas equações (4.5), (4.6), (4.7) e (4.8).

$$\mathbf{V}_{\alpha\beta} = v_\alpha + jv_\beta \quad (4.5)$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta} = i_\alpha + ji_\beta \quad (4.6)$$

$$\mathbf{V}_{dq5} = v_{d5} + jv_{q5} \quad (4.7)$$

$$\mathbf{i}_{dq5} = i_{d5} + ji_{q5} \quad (4.8)$$

De acordo com Srianthumrong e Akagi. (2003) a impedância do filtro passivo LC sintonizado em um referencial estacionário,  $\alpha - \beta$ , é-a descrita pela equação (3.1). Porém pode-se provar que uma função de Laplace,  $F(s)$ , no referencial estacionário é modificado para  $F(s + j\omega)$  quando se considera um referencial rotacionando a uma frequência  $\omega$  – a prova está no Anexo A. Dessa forma, a impedância do filtro passivo no sistema  $d-q$ , rotando na quinta harmônica pode ser obtido conforme a equação (4.9).

$$Z_{Fdq5}(s) = \left( R_F + (s + j\omega_5)L_F + \frac{1}{(s + j\omega_5)C_F} \right) \quad (4.9)$$

A impedância LC em estado permanente pode ser avaliada substituindo  $s = 0$  na equação (4.9), obtendo a equação (4.10) que é análoga a equação (3.1) a distinguir pela frequência da quinta harmônica ( $\omega_5$ ).

$$Z_{Fdq5}(0) = \left( R_F + j\omega_5L_F + \frac{1}{j\omega_5C_F} \right) \quad (4.10)$$

Assim, a tensão de referência para a quinta harmônica pode ser dada pela equação (4.11) em que as tensões são calculadas com base nas correntes da carga que, no sistema  $d-q$  com uma frequência de rotação de  $5\omega_1$ . As componentes da quinta harmônica correspondem a um nível CC e são obtidas por um filtro passa-baixas com frequência de corte de 20Hz.

Esta etapa do controle corresponde ao *Feedforward* e para efeito de implementação são computados em hardware de forma a seguir a equação (4.12) – esta equação é calculada pelo bloco “Calc.” da Figura 18.

$$\mathbf{V}_{dq5}^* = \left\{ R_F + j \left( \omega_5L_F - \frac{1}{j\omega_5C_F} \right) \right\} \bar{\mathbf{i}}_{Ldq5} \quad (4.11)$$

onde  $\bar{\mathbf{i}}_{Ldq5}$  denota a corrente da carga na quinta harmônica da quadratura de rotação.

$$\begin{bmatrix} v_{d5}^* \\ v_{q5}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_F & -\omega_5L_F + \frac{1}{\omega_5C_F} \\ \omega_5L_F - \frac{1}{\omega_5C_F} & R_F \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{Ld5} \\ i_{Lq5} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

A transformação inversa de Parke produz as três fases de tensões de referência desta etapa do controle e estas tensões de referência,  $v_{d5}^*$  e  $v_{q5}^*$ , são somadas ao resultado da etapa de *feedback* descrita acima.

Srianthumrong e Akagi (2003) propõem em seu trabalho que o filtro pode gerar e manter uma tensão DC em um capacitor sem nenhuma fonte externa. Para isso, o controle de tensão do barramento DC do VSI é feito através de um controle PI. Esta potência para manter a energia gasta pelo filtro é somada ao cálculo do *feedback control*, mantendo a energia do capacitor equilibrada.

#### 4.3 COMPORTAMENTO DO FILTRO

Para compreender melhor o funcionamento do filtro híbrido em questão é apresentada a Figura 19, na qual consta o modelo equivalente monofásico do circuito e o circuito equivalente quando o controle é aplicado; com presença de harmônicas.

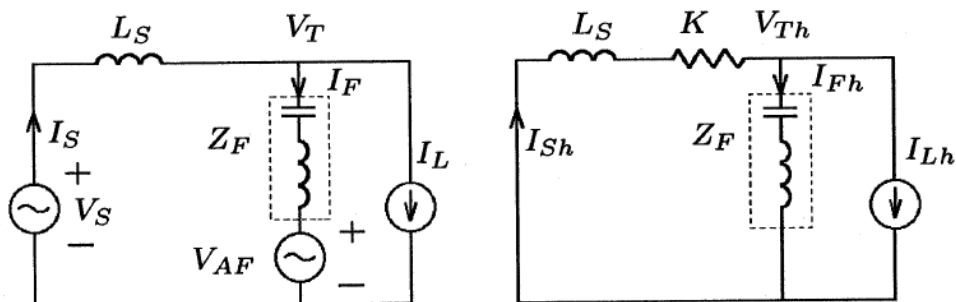
Conforme visto na estratégia de controle, o filtro ativo opera como uma fonte de tensão variável, sendo regulada de acordo com as correntes harmônicas coletadas pelo sensor da fonte de alimentação. No controle, isso é representado pela multiplicação da corrente,  $i_{sh}$ , por um ganho  $K$ , formando assim uma tensão de referência, dado que a nível de circuito  $K$  ele se comporta como um resistor variável. A equação (4.12) representa a tensão de referência gerada pelo filtro ativo.

$$V_{AF} = K i_{sh} \quad (4.12)$$

Na Figura 19 pode-se notar que este ganho isola a corrente harmônica da fonte em relação a fonte. Sendo que, quanto maior o ganho  $K$  do controle, menor a corrente harmônica solicitada pela fonte, haja vista o aumento da impedância aparente imposta no circuito. A equação (4.13) representa a corrente harmônica da fonte em função das impedâncias do circuito.

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{K + sL_S + Z_F} I_{Lh} \quad (4.13)$$

Figura 19 - Circuito equivalente



Fonte: Srianthumrong e Akagi (2003)

Segundo Srianthumrong e Akagi (2003) se o valor do resistor harmônico  $K \gg Z_F$  todas correntes harmônicas injetadas pela carga são drenadas pelo filtro LC. Se  $K \gg \omega_h L_S$  ele dominará as características de filtragem, também agindo como isolamento para ressonâncias entre  $L_S$  e  $Z_F$ .

Logo, assumindo os extremos, se  $K = 0$  temos o filtro ativo desligado, e o filtro passivo drenará principalmente a harmônica para qual foi sintonizado. Nesta condição tem-se a equação (4.14) onde a corrente harmônica da fonte em função das solicitadas pela carga e as impedâncias da fonte e do filtro passivo.

$$I_{Sh} = \frac{Z_F}{sL_S + Z_F} I_{Lh} \quad (4.14)$$

Se  $K \rightarrow \infty$  há um isolamento, de correntes harmônicas, da carga em relação a fonte de alimentação, com isso, tem-se a condição ideal e todas as harmônicas são fornecidas ou drenadas pelo filtro. Notoriamente isto é inviável, haja vista que o ganho do controle não pode ser infinito e valores altos de  $K$  elevam a potência do filtro, tornando-o uma solução impraticável.

## 5. SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com o objetivo de analisar o funcionamento do circuito sob diferentes situações de carga e também variando parâmetros do filtro, foram criadas situações de ocorrência comum em uma planta industrial.

O software utilizado para as simulações foi o PSIM© versão 9.0, desenvolvido pela Powersim Inc., é um software voltado para sistemas de potência e possui uma grande variedade de aplicações, tais com processamento de sinais, construção de gráficos, desenvolvimento de algoritmos e computação numérica. Os controles são mostrados nas Figuras 21 e 22.

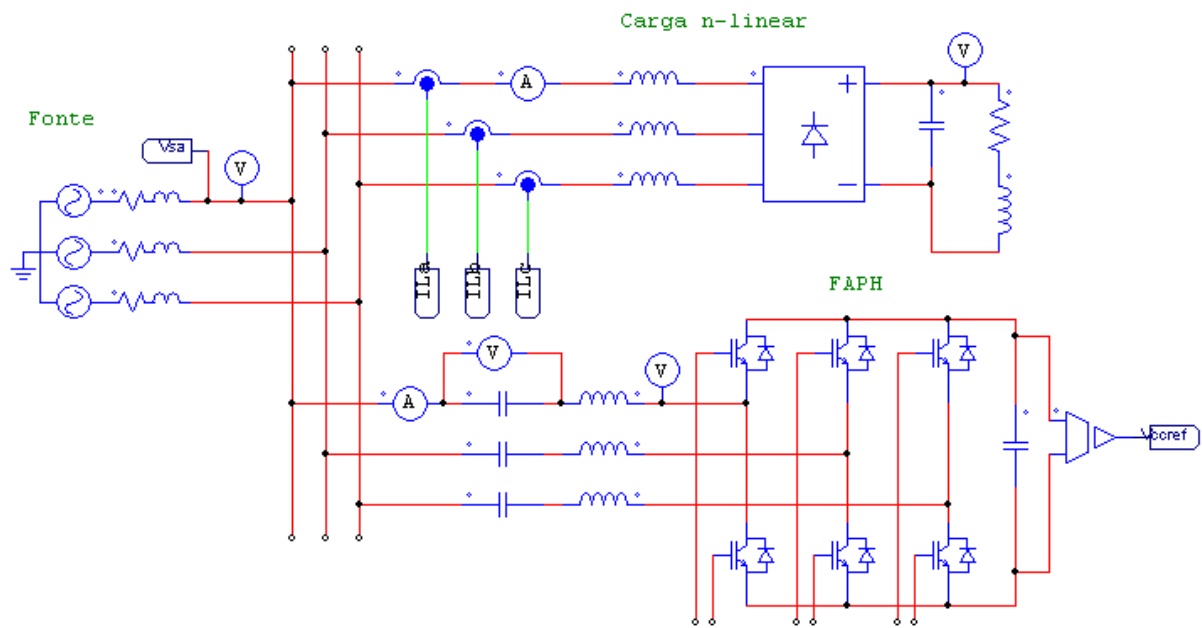
Os parâmetros do sistema principal (Figura 20) são listados a seguir:

- a) Tensão da fonte de alimentação: 380V(rms);
- b) Frequência da fonte: 60Hz;
- c) Indutor do filtro de linha da carga: 3,0mH;
- d) Tensão no barramento CC do filtro híbrido: 200Vcc;
- e) Indutor do filtro híbrido: 1,5mH;
- f) Capacitor do filtro: 100 $\mu$ F;
- g) Potência base: 20kVA (impedância de  $7,22\Omega = 1\text{p.u.}$ ).

Como base para simulação utiliza-se valores conhecidos do transformador de alimentação de uma empresa. Este tem potência nominal de 1000kVA, logo uma corrente nominal de 1519A.

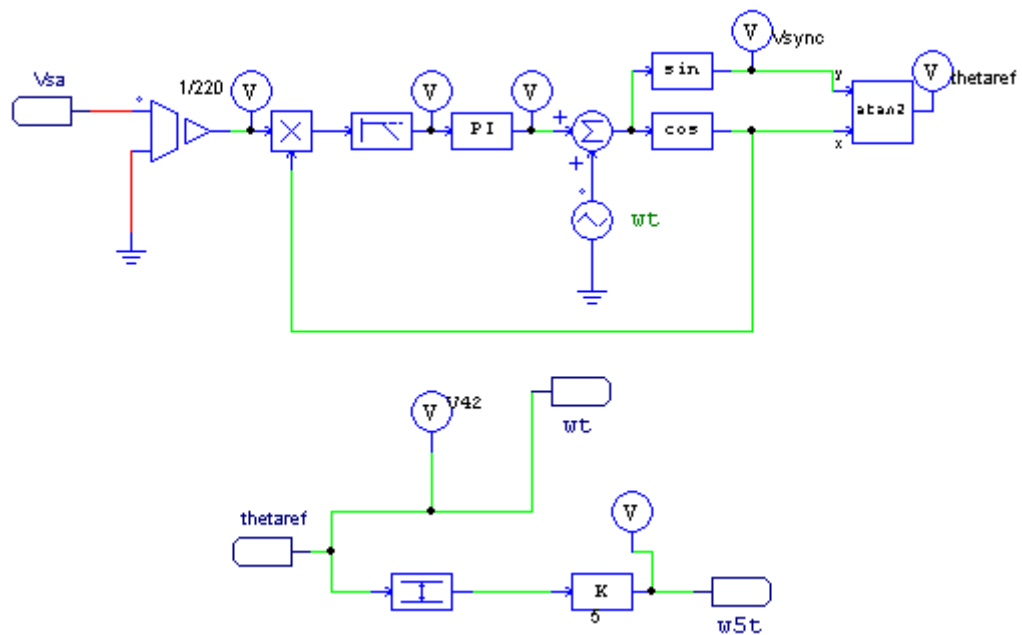
A impedância deste transformador é de 0,0575 p.u. e portanto sua corrente de curto circuito é da ordem de 27kA. Devido às demais impedâncias do sistema será considerada uma corrente de curto circuito de 25kA, que servirá de base para a análise de mitigação das harmônicas dada pela Tabela 7, que trata dos limites das harmônicas de acordo com a corrente de carga e a corrente de curto circuito.

Figura 20 – Circuito de potência



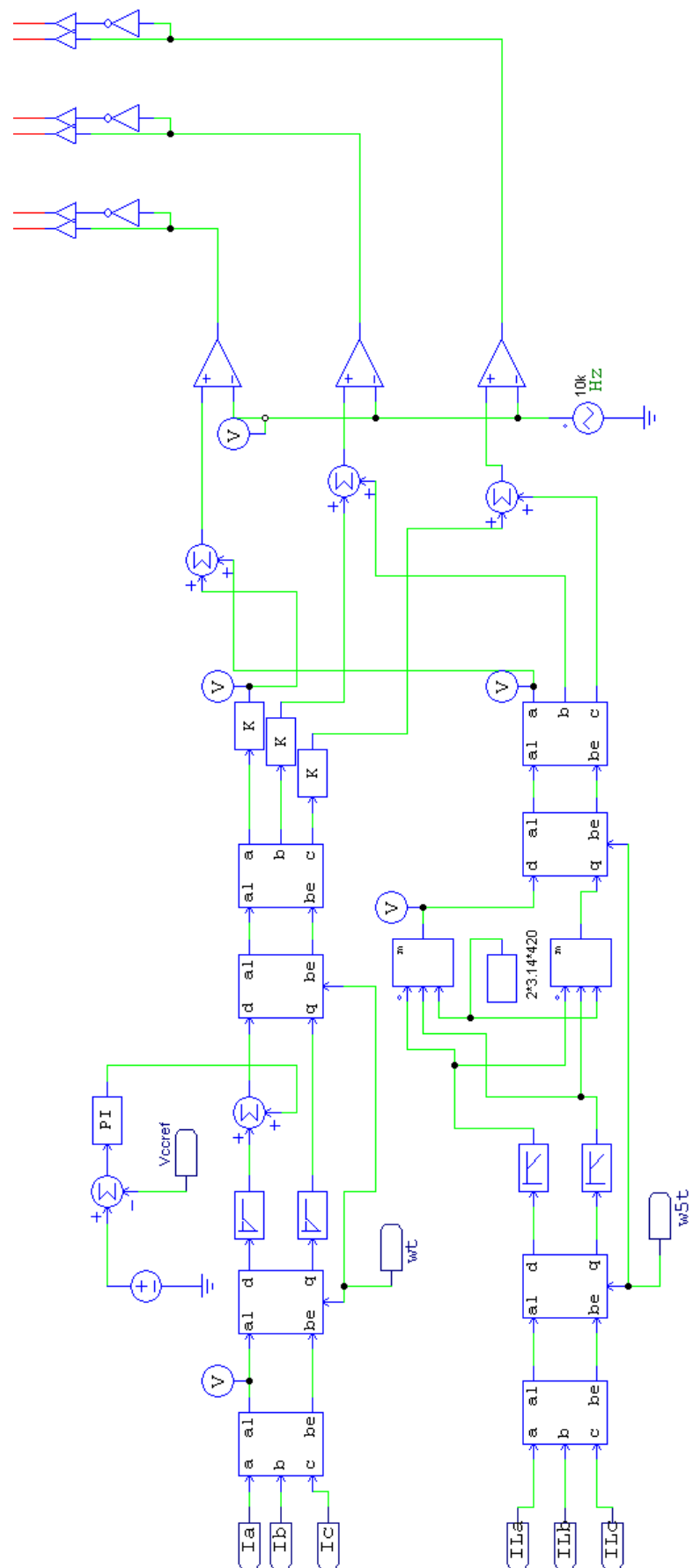
Fonte: O próprio autor

Figura 21 – PLL e gerador de referência síncrona



Fonte: O próprio autor

Figura 22 – Circuito do controle



Fonte: O próprio autor



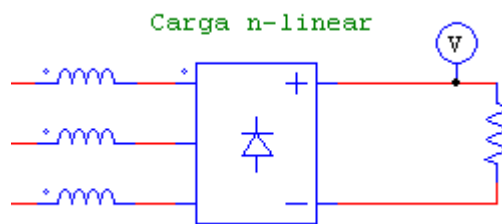
## 5.1 CARGA R 10Ω - CASO 1

O primeiro caso simula um retificador não controlado de seis pulsos com uma carga puramente resistiva no lado CC do retificador, o filtro de linha indutivo, 3mH (7,8%), está no lado AC. A Figura 23 representa a configuração desta carga.

Neste primeiro caso também se avaliará o uso do controle *feedforward*. Para todos os casos o seu funcionamento tem efeito muito similar, portanto os demais casos serão simulados com o controle *feedforward* em funcionamento.

Também será avaliado um ganho  $K = 0$ , fazendo com que o filtro ativo fique desativado. Conforme pode ser observado na equação (4.13) as correntes harmônicas provenientes da fonte são função da impedância da fonte e do filtro passivo. Nesta avaliação, o filtro passivo estará mitigando as harmônicas para qual foi projetado.

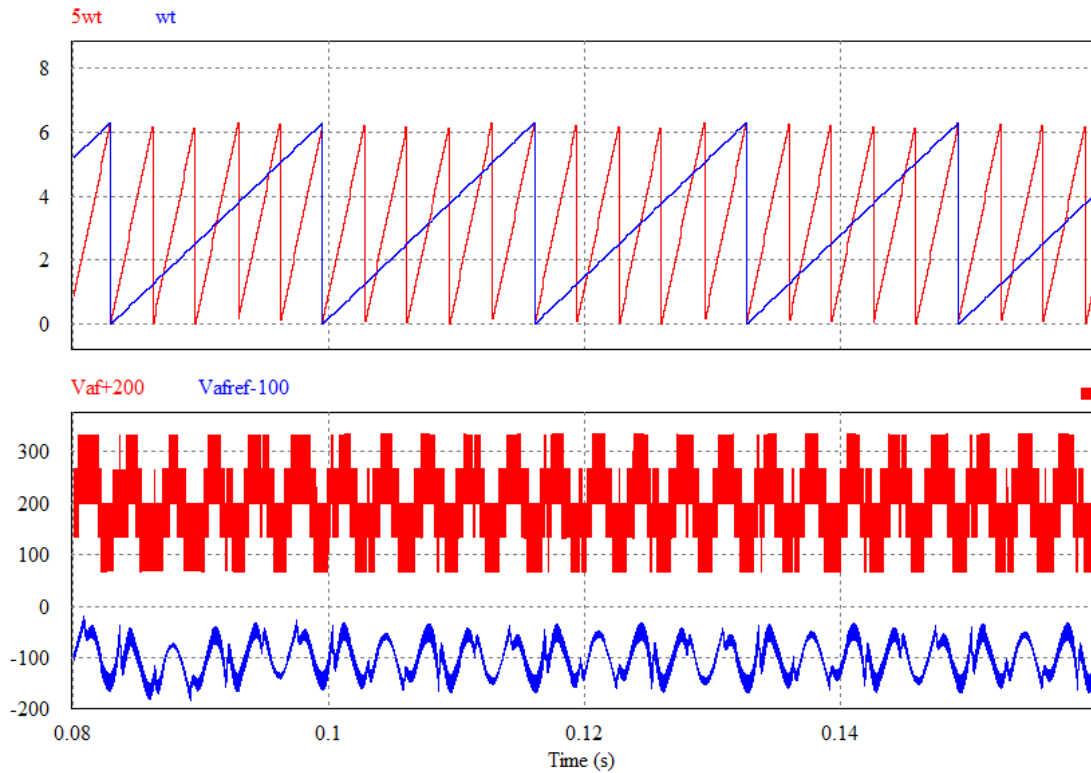
Figura 23 - Carga CC puramente resistiva



Fonte: O próprio autor

No primeiro gráfico da Figura 24 são expostos os sinais de referência de rotação  $\omega t$  e  $\omega_5 t$  que são bases para o uso do SRF. Na mesma figura, no segundo gráfico tem-se o sinal  $V_{af}$  (representada pela cor azul) que é o sinal de tensão a ser seguido pelo filtro e o sinal PWM correspondente a saída do filtro (na cor vermelha), ao passar pelo filtro passivo as altas frequências são atenuadas.

Figura 24 - Sinais do controle e PWM

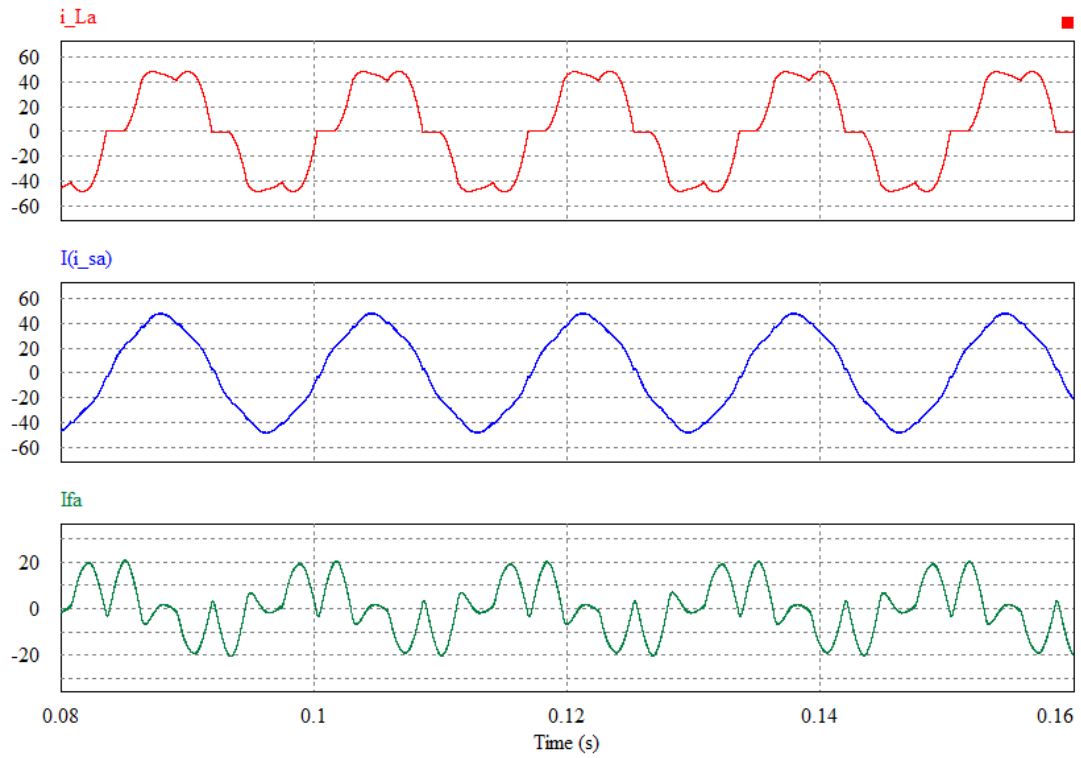


Fonte: O próprio autor

Para esta carga o filtro se comporta de forma adequada, sendo que a carga resistiva de  $10\Omega$ . Nas Figuras 25, 26, 27 e 28 são expostas as formas de corrente e sua FFT, onde  $i_{La}$  é a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $I_{fa}$  a corrente do filtro híbrido.

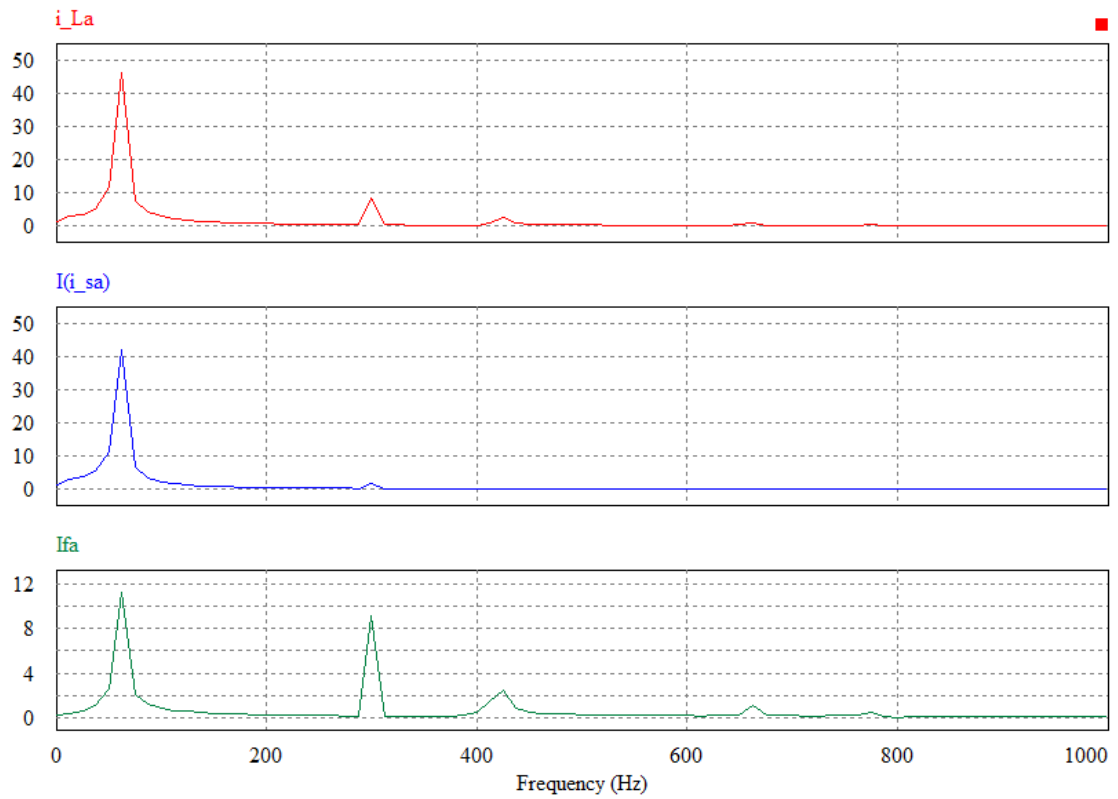
Nesta simulação a DHTi da corrente de carga é de 19,2% e obteve-se uma redução com o controle de *feedback* para 8,75%. Quando aplicado o controle de feedback mais o controle de *feedforward* o resultado foi uma queda da DHTi para 4,72%, uma melhora de 46% em relação ao controle *feedback* isolado. Nos gráficos das FFTs com e sem o *feedforward* pode-se observar que o pico das correntes de quinta harmônica geradas pelo filtro variam, sendo 8,66A sem o controle e 9,25A quando ele é aplicado.

Figura 25 – Correntes no circuito

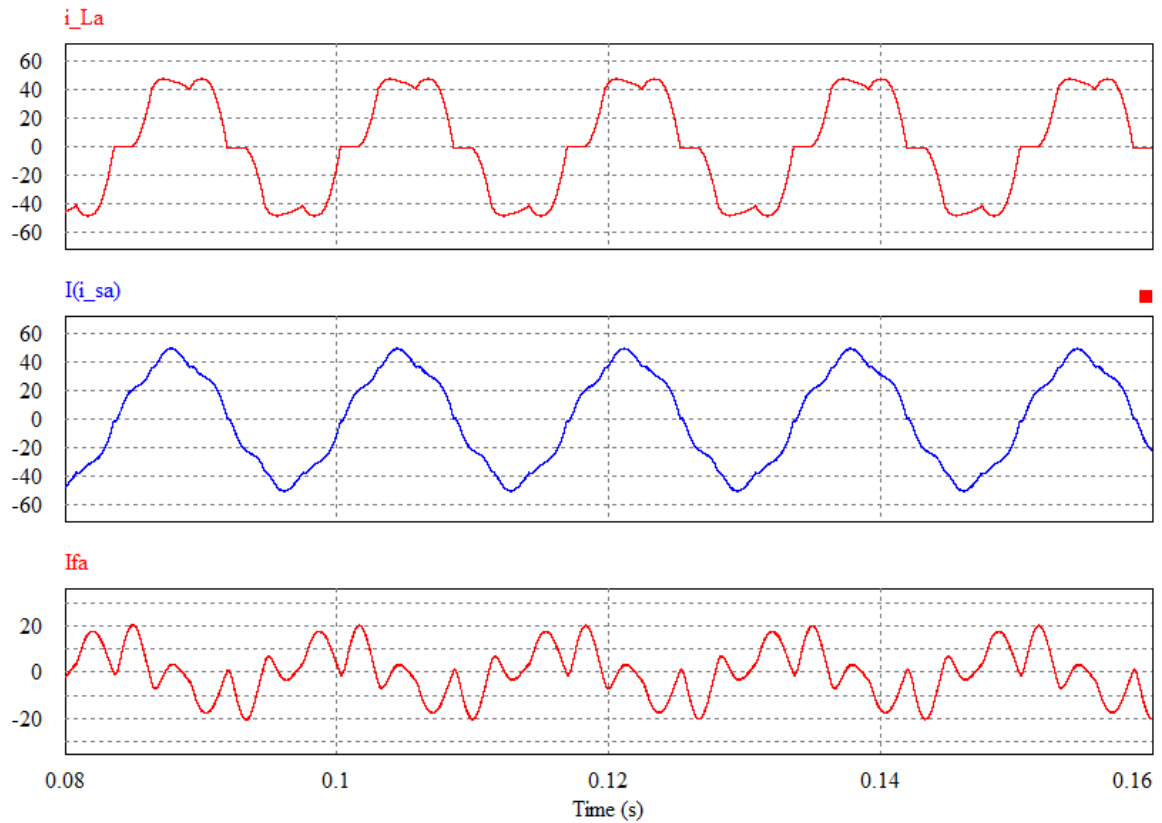


Fonte: O próprio autor

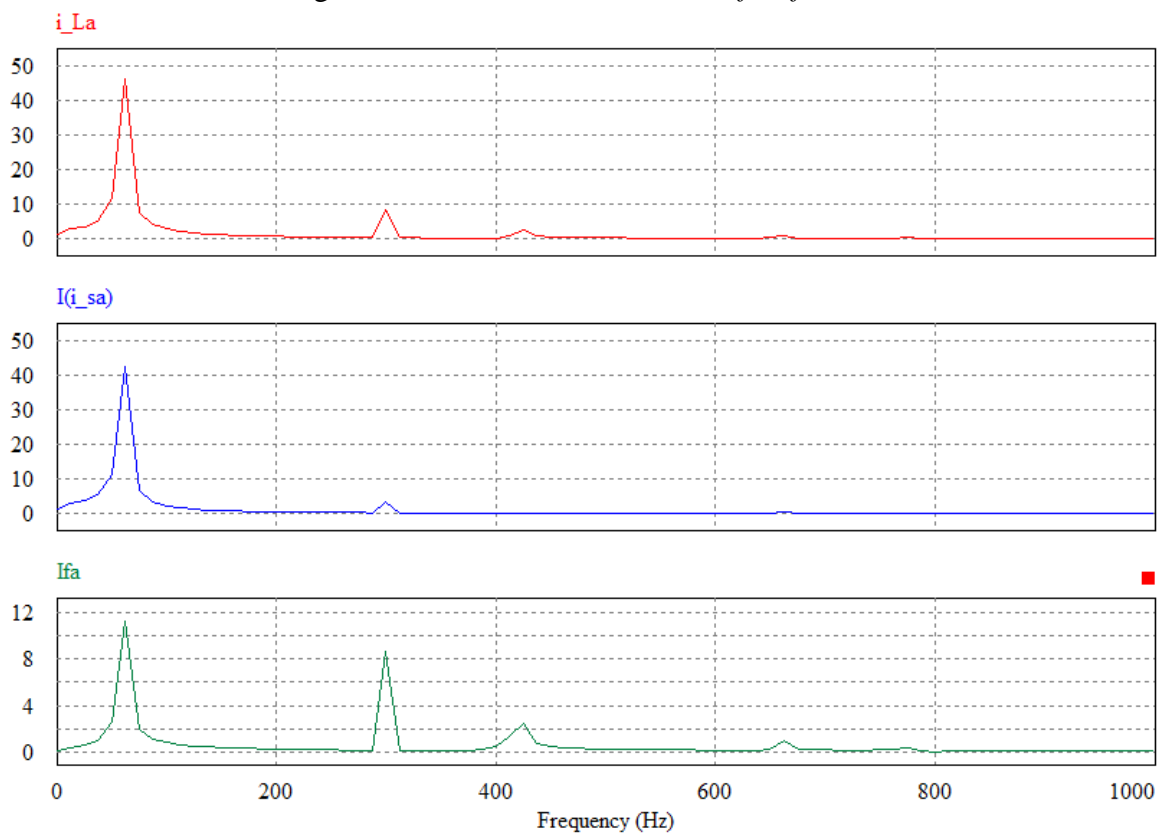
Figura 26 – FFT das correntes



Fonte: O próprio autor

Figura 27 – Correntes sem o controle *feedforward*

Fonte: O próprio autor

Figura 28 – FFT das correntes sem *feedforward*

Fonte: O próprio autor

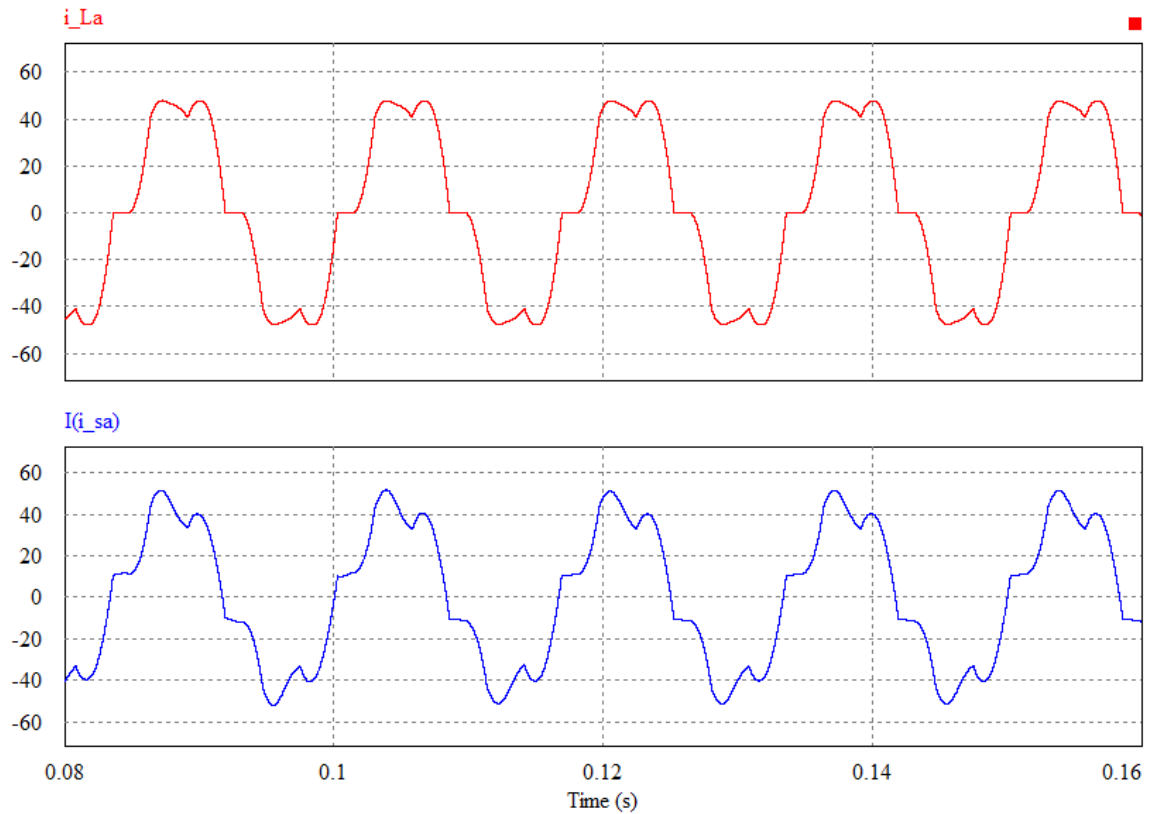
As harmônicas individuais até a 13ª são descritas na Tabela 13 e são representadas pela amplitude da corrente e pela porcentagem em relação a frequência fundamental. A tabela contempla as correntes harmônicas da carga e da fonte para os dois casos: com e sem o controle *feedforward*. Comparando com a Tabela 7 verifica-se que as correntes individuais ficaram abaixo de 11% mesmo sem o controle *feedforward* o que valida a mitigação de acordo com a IEEE std 519.

Tabela 13 – Correntes para simulação com e sem controle *feedforward*

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte, Sem <i>Feedforward</i> (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte, Com <i>Feedforward</i> (A)	$I_h/I_1$ %
1	46,2	100	42,5	100	42,2	100
5	8,54	18,4	3,62	8,51	1,88	4,45
7	2,58	5,58	1,32	3,10	0,65	1,54
11	1,21	2,61	0,68	1,60	0,21	0,49
13	0,62	1,34	0,31	0,72	0,20	0,47

Fonte: O próprio autor

Propondo um desligamento do filtro ativo, fazendo  $K = 0$  no controle, o equivalente a aterrar o filtro passivo. Desta forma serão desviadas para terra as correntes na qual o filtro foi sintonizado. A Figura 29 apresenta o comportamento da corrente quando o filtro ativo é desativado.

Figura 29 – Comportamento das harmônicas com ganho  $k=0$ 

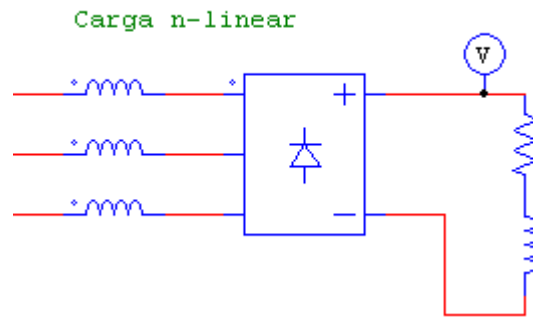
Fonte: O próprio autor

Ao analisar o comportamento das harmônicas na carga e na fonte nota-se que a DHTi na carga é de 18,9%, enquanto na fonte é de 21,09%. Tal efeito ocorre porque a impedância da fonte é menor do que a impedância do filtro de linha da carga, assim os harmônicos circularão com mais facilidade pela fonte, fazendo com que a distorção seja maior do que na carga.

## 5.2 CARGA RL $(10 + j1 \cdot 10^{-3})\Omega$ - CASO 2

Simula um retificador não controlado com uma carga RL no lado CC. O filtro de linha indutivo está no lado AC mantendo a mesma impedância do Caso 1 (7,8%). A Figura 30 representa a configuração desta carga sendo com metade da potência ativa.

Figura 30 – Carga do Caso 2



Fonte: O próprio autor

Nesta configuração a DHTi de carga é de 20,4% e o funcionamento do filtro foi adequado, passando a DHTi da fonte para 6,58%, porém a TDD calculada é de 3,58%. Na Tabela 14 pode-se observar as harmônicas individuais e na Figura 31 fica evidente que para esta configuração o filtro consegue mitigar os harmônicos de corrente, porém com uma distorção maior comparada ao caso anterior.

Tabela 14 – Correntes harmônicas com impedância ( $10 + j1 \cdot 10^{-3}$ )

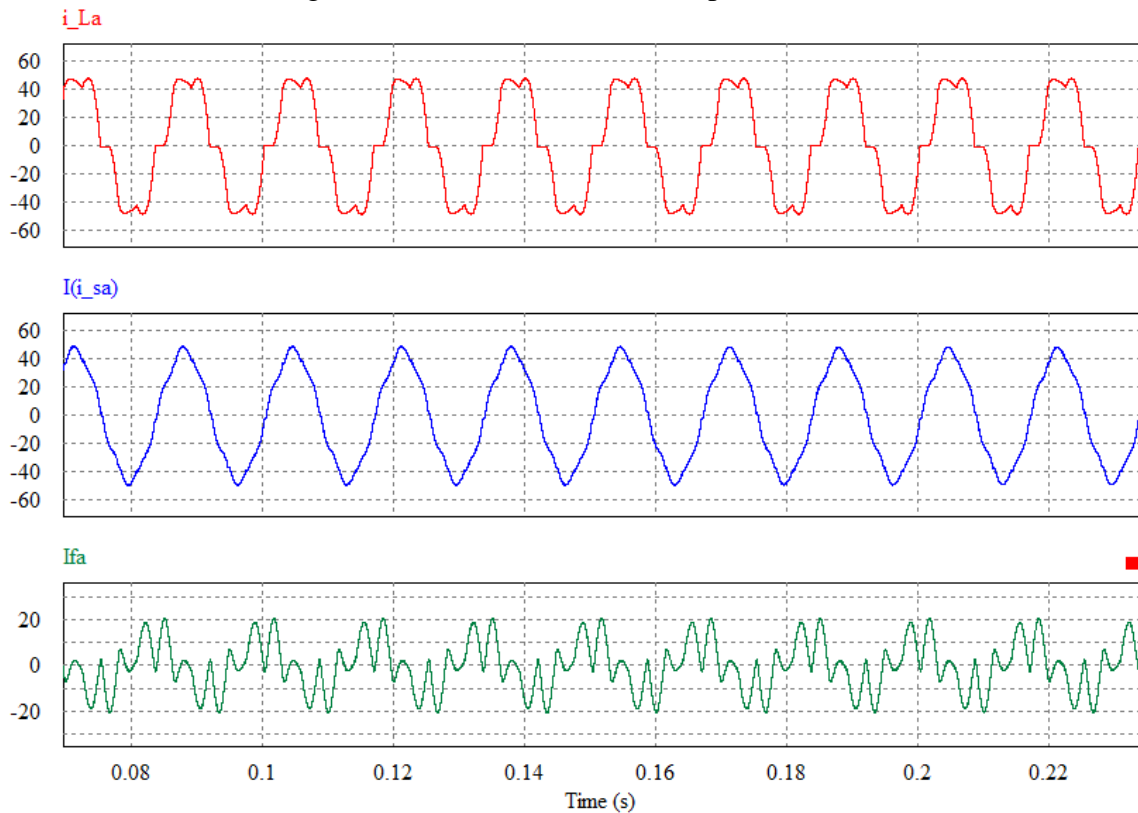
Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	46,3	100	42,6	100
5	8,33	17,9	1,83	4,29
7	2,41	5,20	0,71	1,66
11	1,14	2,46	0,22	0,51
13	0,88	1,90	0,22	0,51

Fonte: O próprio autor

A Figura 31 contempla as formas de onda das correntes onde,  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $I_{fa}$  a corrente do filtro híbrido.

A similaridade das formas de onda da simulação do Caso 1 são parecidas com a da obtida na Figura 31. O formato da carga RL praticamente não muda o comportamento das correntes obtidas.

Figura 31 - Correntes no circuito para o Caso 2

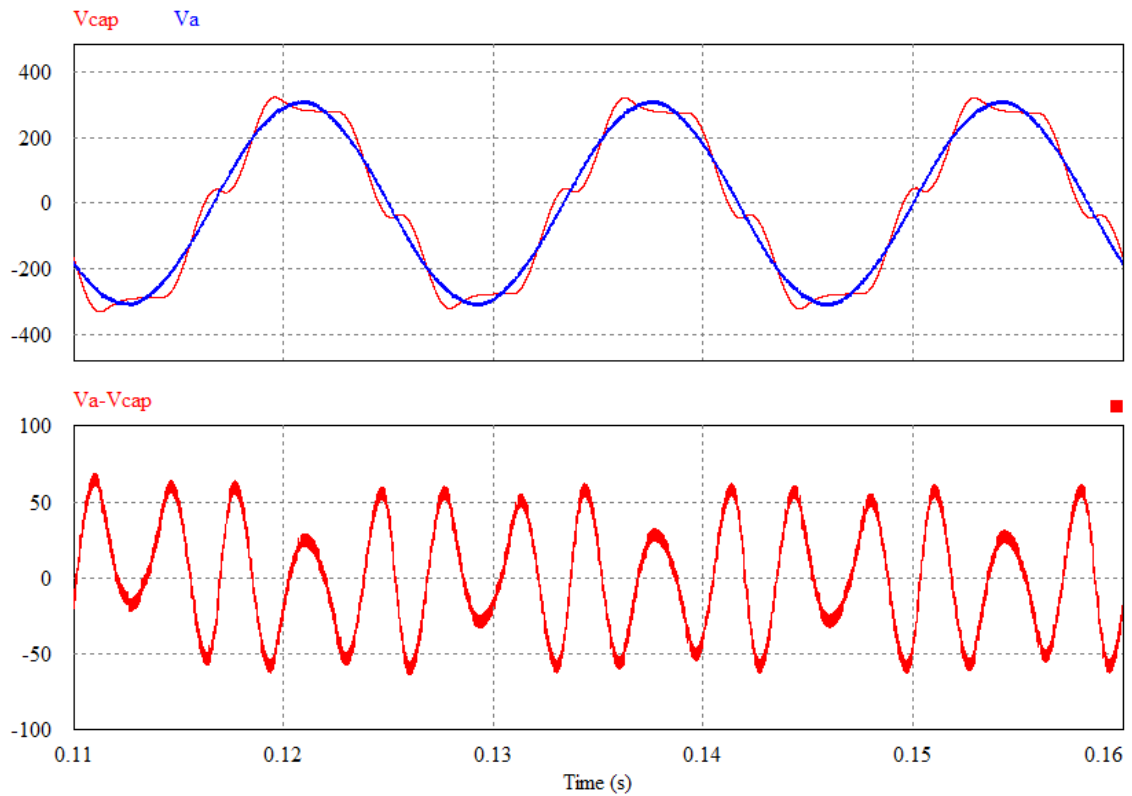


Fonte: O próprio autor

No primeiro gráfico da Figura 32 é demonstrada a tensão da fonte superposta a tensão do capacitor de acoplamento. Pode-se notar pelo segundo gráfico, que a queda de tensão no capacitor de acoplamento é muito próxima a tensão da fonte. Assim, a tensão no filtro é cerca de 16% a da tensão imposta pela fonte. Assim a potência do filtro híbrido pode ser reduzida (cerca de 10% da potência da carga), visto que este trabalha em um nível de tensão menor.



Figura 32 - Tensão no capacitor de acoplamento e no filtro



Fonte: O próprio autor

### 5.3 CARGA RL ( $30 + j1 \cdot 10^{-3}$ ) $\Omega$ - CASO 3

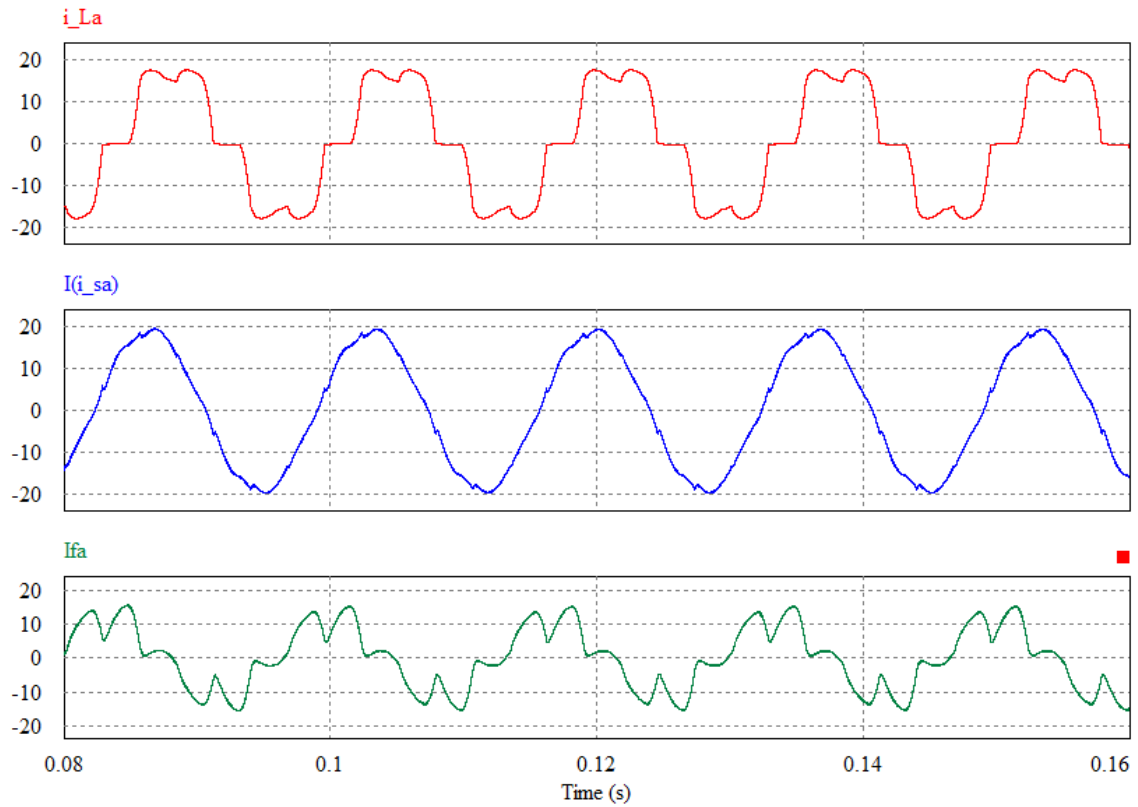
Novamente foi simulada a configuração de carga proposta na Figura 30, onde obteve-se um comportamento análogo ao do Caso 2, sendo que a DHTi da carga é de 24,6% e a da fonte 5,18%. Nestas condições a DDT foi calculada como 3,29%. A Figura 33 apresenta as correntes obtidas nesta simulação e, apesar de uma distorção maior o filtro mostrou-se eficiente, sendo que as harmônicas individuais foram reduzidas de modo satisfatório, conforme visto na Tabela 15.

Tabela 15 – Correntes harmônicas com impedância ( $30 + j1 \cdot 10^{-3}$ )

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	16,6	100	15,9	100
5	4,01	24,1	0,68	4,27
7	1,2	7,22	0,69	4,33
11	0,91	5,48	0,20	1,25
13	0,38	2,28	0,11	0,69

Fonte: O próprio autor

Figura 33 - Correntes harmônicas para o Caso 3



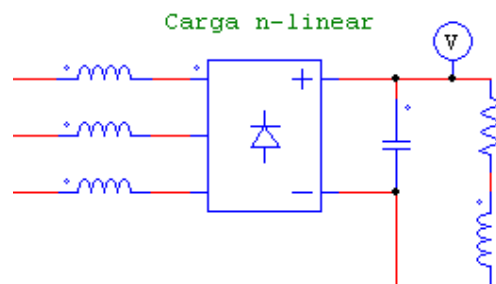
Fonte: O próprio autor

De acordo com as recomendações da IEEE std 519 o filtro é funcional para a mitigação nessas condições de carga. Vale ressaltar quanto menor a potência ativa solicitada pela carga, maior é o “esforço” do filtro em suprir as correntes que geram potência ativa.

#### 5.4 CARGA RLC $((30 + j1 \cdot 10^{-3}) \parallel j1500 \cdot 10^{-6})\Omega$ - CASO 4

A Figura 34 apresenta o modelo de carga RLC proposto para o Caso 4, esta configuração conta com um filtro capacitivo, que mantém um nível CC com baixa variação na saída do retificador.

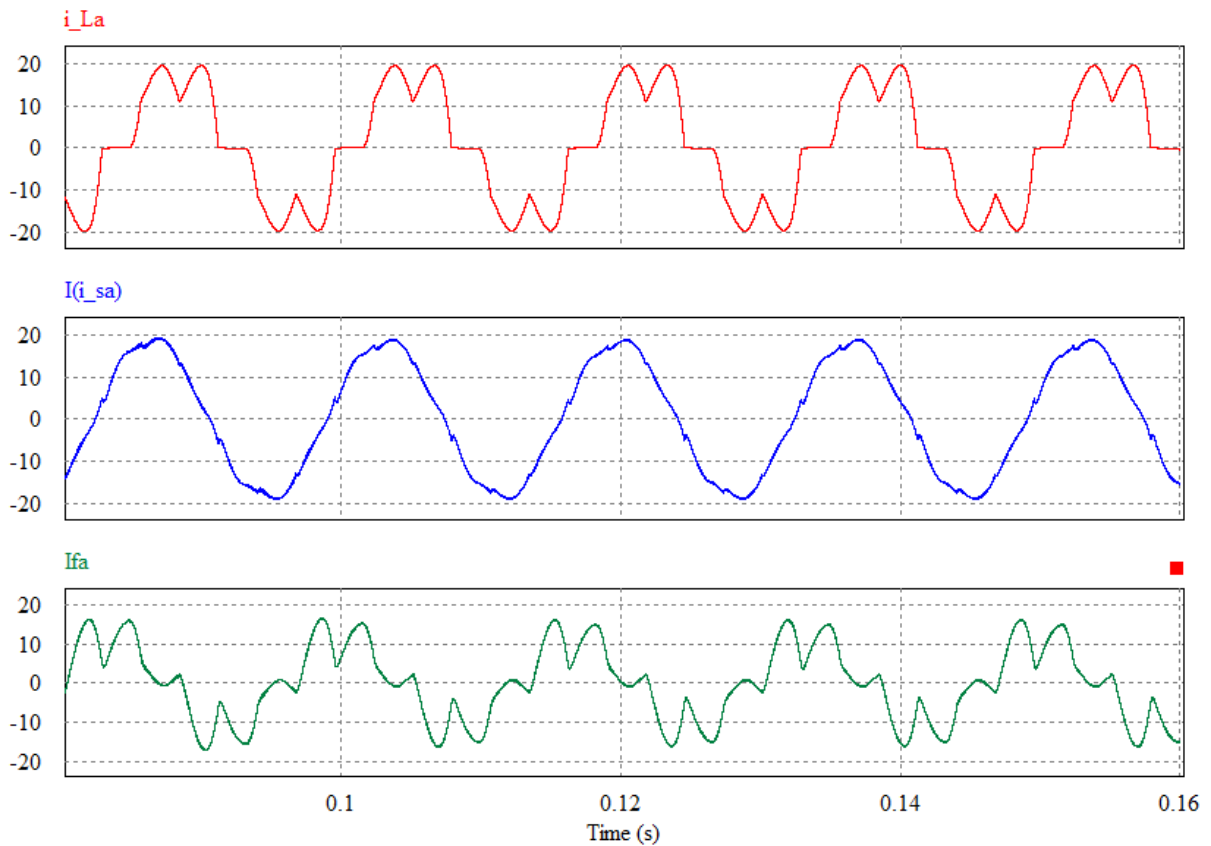
Figura 34 - Carga RLC



Fonte: O próprio autor

A Figura 35 apresenta os gráficos das correntes da fase A, sendo  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $I_{fa}$  a corrente do filtro híbrido.

Figura 35 - Correntes harmônicas para o Caso 4



Na Tabela 16 são expostos os harmônicos individuais onde novamente o filtro auxiliou na redução das correntes harmônicas que seriam drenadas da fonte. Para a DHTi teve-se um resultado de 29,6% na carga e 4,81% na fonte. Nesta configuração a compensação do filtro foi aceitável e, de acordo com a Tabela 7, o filtro está de acordo com a normativa IEEE std 519.

Tabela 16 – Correntes harmônicas para impedância  $((30 + j1 \cdot 10^{-3}) \parallel j1500 \cdot 10^{-6})$

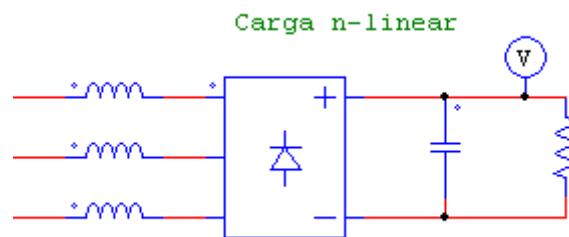
Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	16,6	100	16,3	100
5	5,02	30,2	0,81	4,96
7	0,96	5,78	0,11	0,67
11	0,86	5,18	0,29	1,77
13	0,46	2,77	0,15	0,92

Fonte: O próprio autor

### 5.5 CARGA RC ( $10 \parallel -j1500 \cdot 10^{-6}$ ) - CASO 5

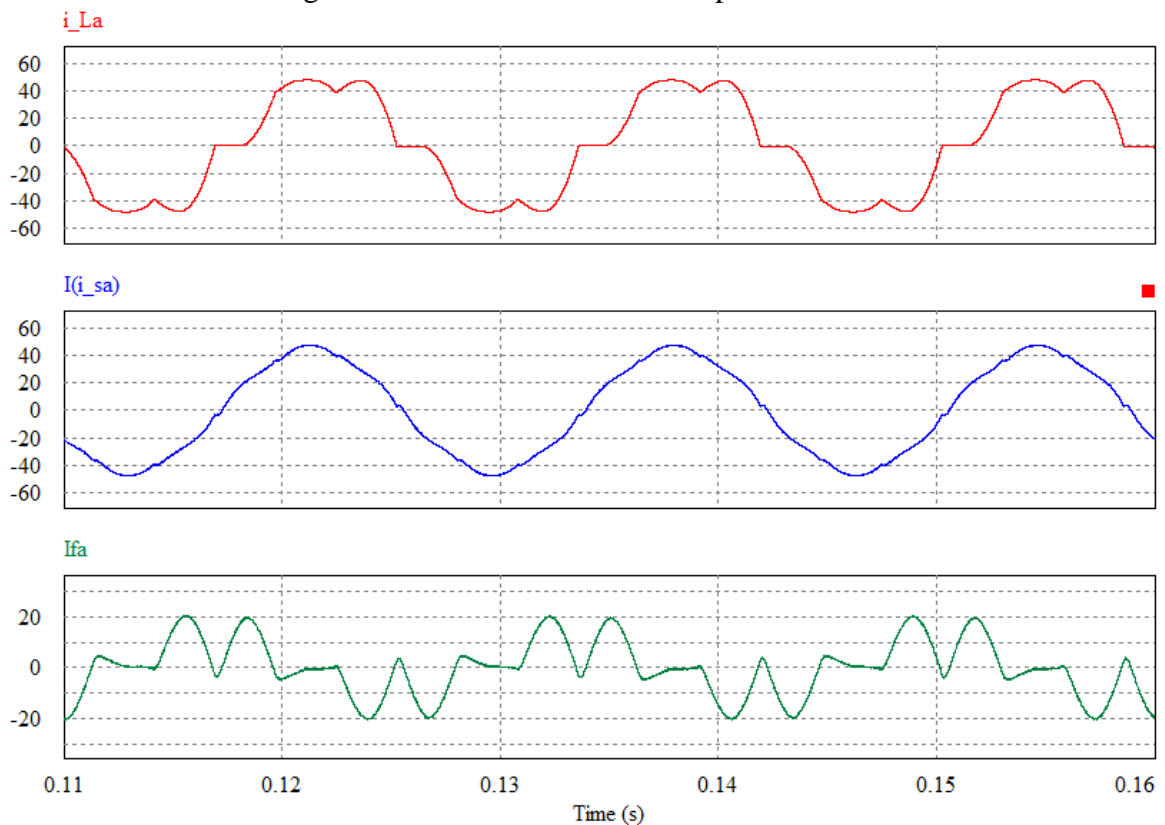
O Caso 5 representa um retificador não controlado com um filtro capacitivo e uma carga com característica resistiva sendo representado na Figura 36. Neste caso simula-se um conversor CC com uma tensão de saída quase-constante provinda do filtro capacitivo. Este é conectado a uma carga resistiva. A representação das correntes desta carga é demonstrada na Figura 37.

Figura 36 – Carga RC



Fonte: O próprio autor

Figura 37 - Correntes harmônicas para o Caso 5



Fonte: O próprio autor

Novamente tem-se uma redução significativa dos harmônicos individuais conforme dados da Tabela 17. Ainda para a DHTi obteve-se uma redução de 18,7% para 4,51%, sendo que novamente o filtro atuou de forma conveniente e de acordo com as condições propostas está dentro dos limites recomendados pela IEEE std 519.

Tabela 17 – Correntes harmônicas com impedância ( $30 + j1500 \cdot 10^{-6}$ )

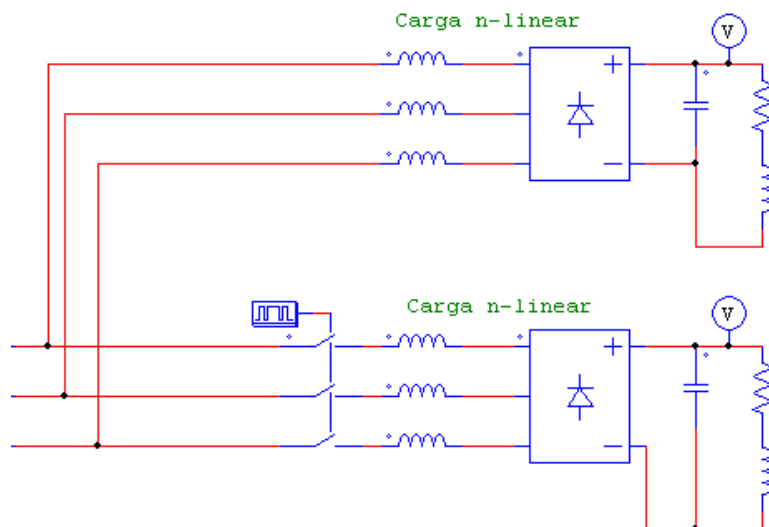
Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	46,2	100	42,4	100
5	7,97	17,2	1,70	4,00
7	3,06	6,62	0,93	2,19
11	1,12	2,42	0,092	0,21
13	0,82	1,77	0,29	0,68

Fonte: O próprio autor

## 5.6 COMUTAÇÃO DE CARGA RLC - CASO 6

O Caso 5 representa dois retificadores não controlado com a finalidade de observar o comportamento do filtro e avaliar o tempo de resposta quando é comutada a carga de 50% da potência nominal para 100% e após saindo da carga nominal para meia carga. A Figura 38 representa a carga deste caso, sendo que os valores dos componentes L e C são os mesmos do caso 4 e  $R = 20\Omega$  em cada carga.

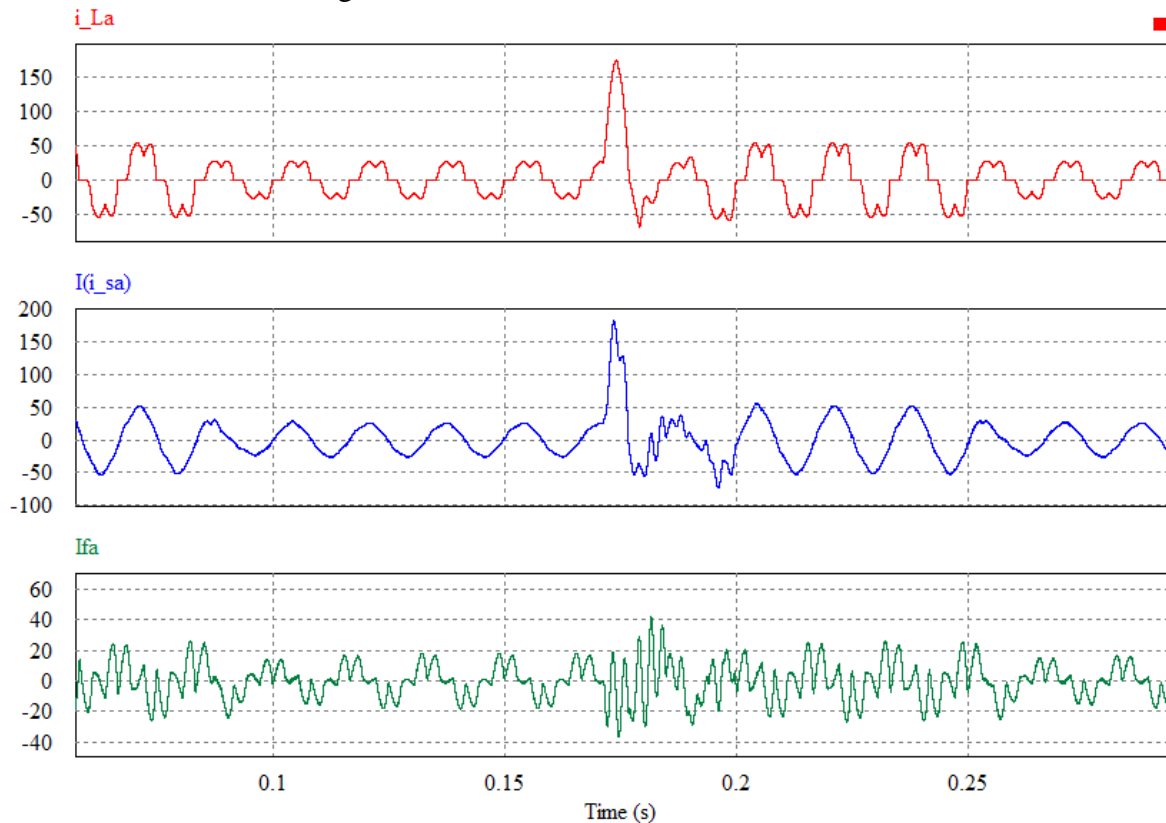
Figura 38 - Comutação de carga



Fonte: O próprio autor

Nesta condição a DHTi da carga varia de 24,6% (maior carga) a 26,0% (menor carga). Na Figura 39 estão dispostas as correntes obtidas, sendo  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $I_{fa}$  a corrente do filtro híbrido.

Figura 39 - Correntes harmônicas do Caso 6



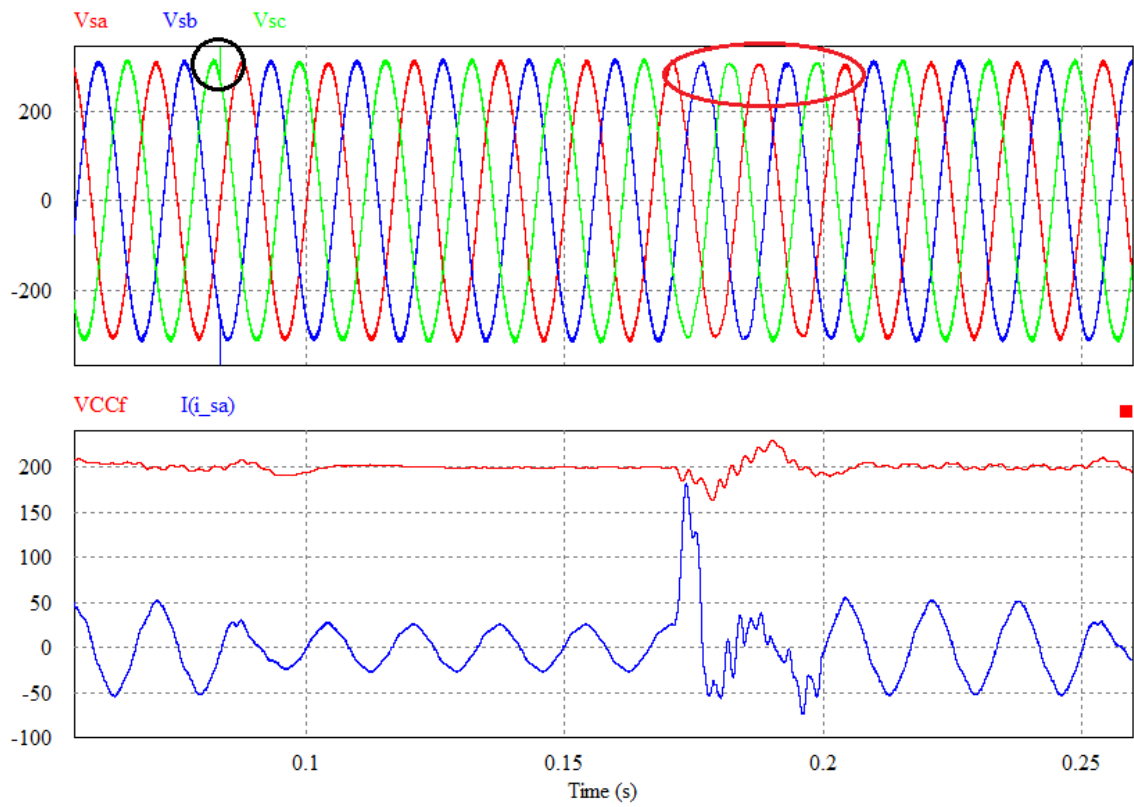
Fonte: O próprio autor

Ao comutar negativamente, da carga nominal para meia carga, surge um pico de tensão na fonte e em aproximadamente 15ms o filtro estabiliza a corrente drenada da fonte, reduzindo as componentes harmônicas. Ao comutar de meia carga para carga nominal ocorre um pico de corrente e um afundamento na tensão da fonte, o pico de corrente se deve a carga do capacitor desta segunda carga. O primeiro gráfico da Figura 40 destaca o pico de tensão (círculo preto) e o afundamento de tensão (elipse vermelha) no momento das comutações.

No segundo gráfico da Figura 40 tem-se o comportamento do capacitor do link CC do filtro híbrido, nota-se que o controle faz com que o valor se estabilize em menos de 3 ciclos provando o bom funcionamento do controle CC.

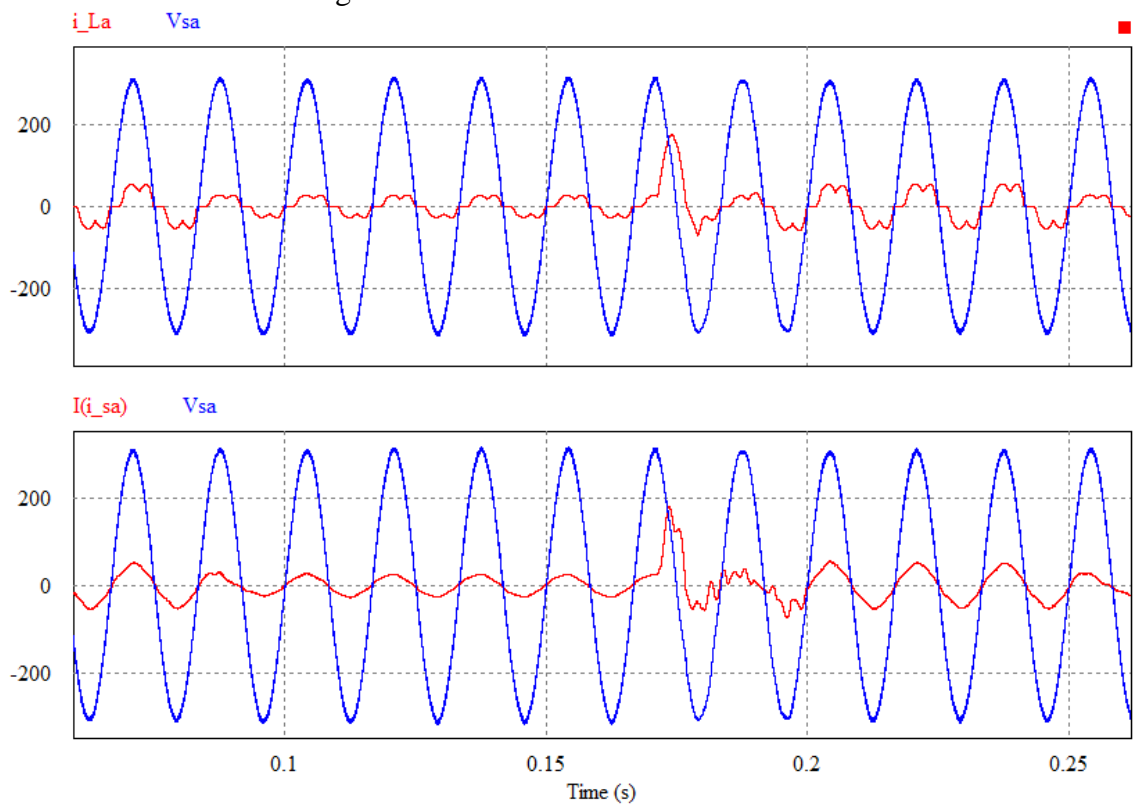
Outro ponto que ainda não foi citado, mas se comportou de forma análoga em todos casos anteriores é a melhora no fator de potência, que, nesta simulação, fica interessante evidenciar sua efetividade. A Figura 41 mostra a sobreposição das correntes de carga e da fonte com as tensões da fonte, nesta simulação obteve-se uma melhora do FP de 0,84 para 0,98.

Figura 40 - Pico e afundamento de tensão



Fonte: O próprio autor

Figura 41 – Tensões e correntes do Caso 6



Fonte: O próprio autor

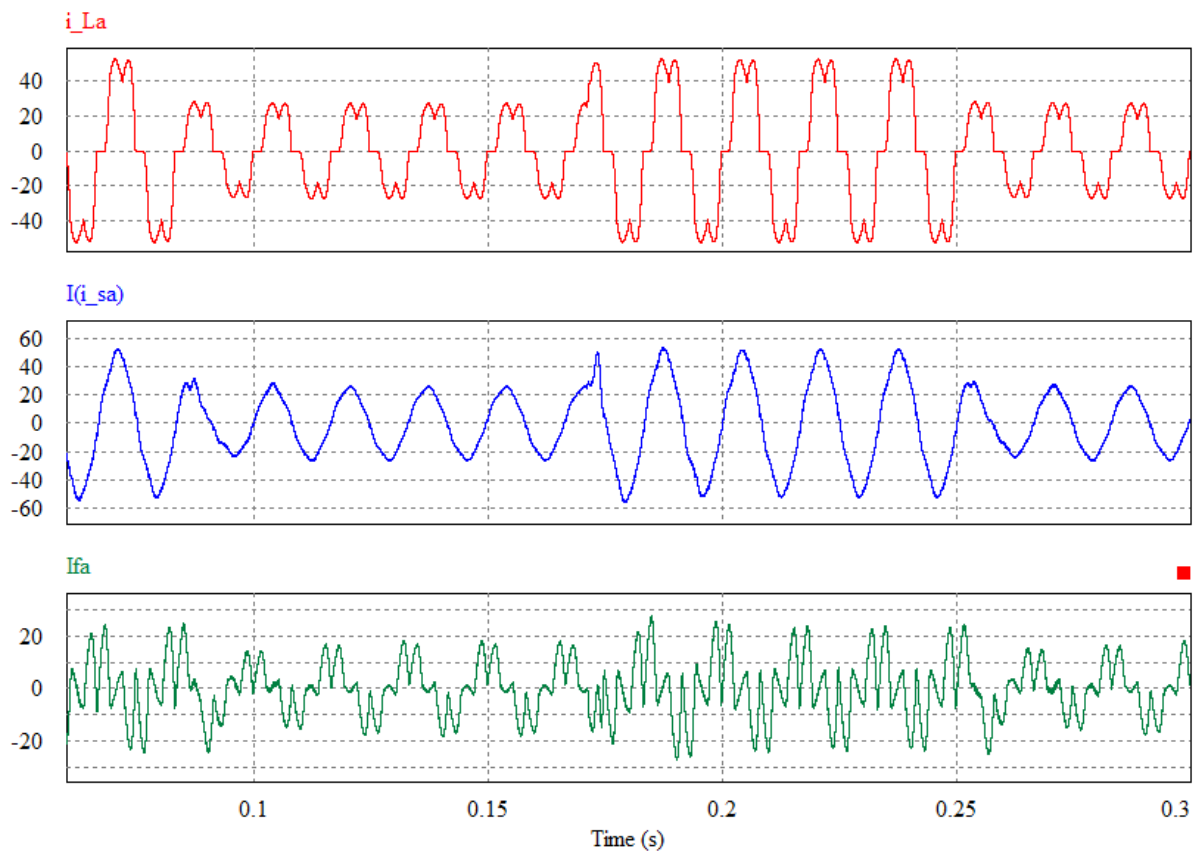
Para efeito de averiguar a efetividade do filtro na dinâmica desta simulação, a Tabela 18 apresenta os valores obtidos para as harmônicas individuais e a Figura 42 apresenta a comutação caso o capacitor da segunda carga tivesse controle da corrente *in-rush* fazendo com que não surja pico de corrente na comutação positiva.

Tabela 18 – Correntes harmônicas com comutação

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	27,9	100	25,1	100
5	8,44	30,2	1,52	6,05
7	2,12	7,59	0,61	2,43
11	0,25	0,89	0,14	0,55
13	0,97	3,47	0,26	1,03

Fonte: O próprio autor

Figura 42 – Correntes com controle da comutação



Fonte: O próprio autor

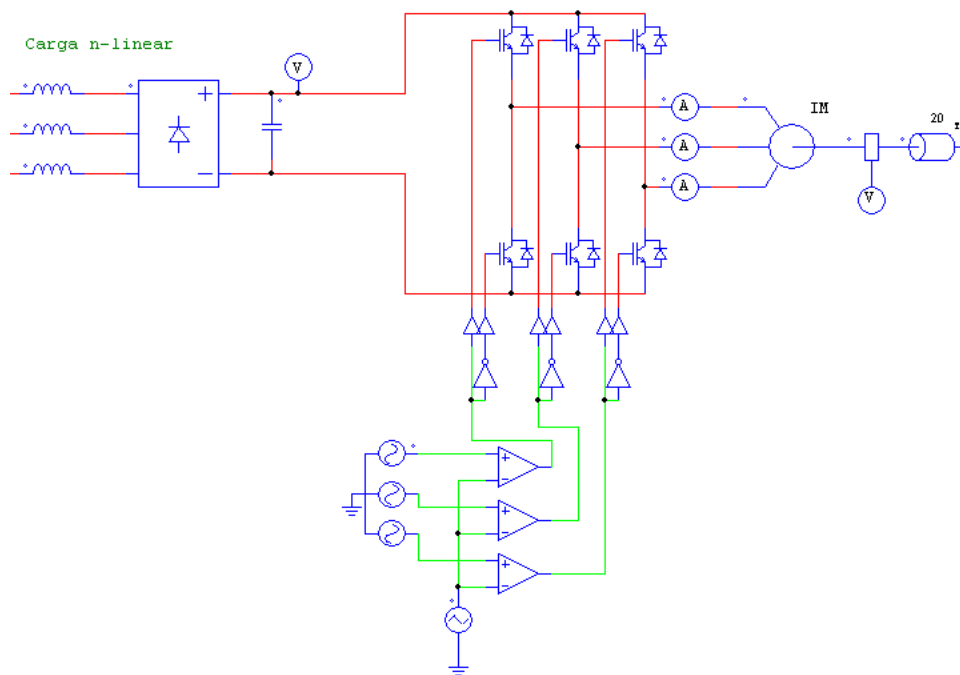
Mesmo com a variação abrupta de corrente o filtro foi capaz de seguir a corrente e auxiliar na redução dos harmônicos. Novamente o comportamento do filtro é adequado e a mitigação efetiva.



## 5.7 INVERSOR COM MOTOR (CONJUGADO MECÂNICO 20Nm) - CASO 7

Dentre os casos propostos, este foi o que apresentou maior instabilidade em regime permanente sendo que há uma constante variação na corrente drenada pela carga. A Figura 43 representa a carga proposta no Caso 7.

Figura 43 - Inversor com motor sob carga mecânica

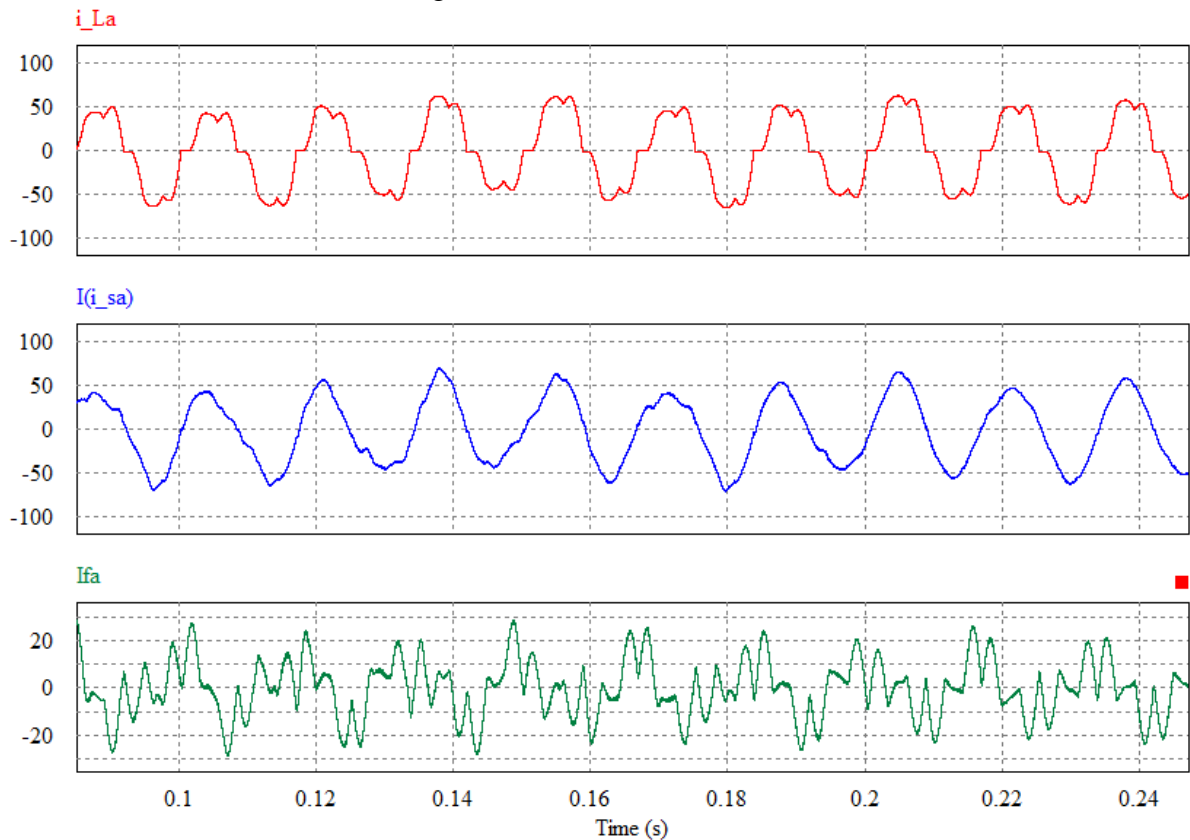


Fonte: O próprio autor

De acordo com as simulações, mesmo com a dinâmica da carga o controle conseguiu seguir a referência e gerar as compensações necessárias para manter uma baixa distorção harmônica na fonte. A DHTi na carga é 19,97% e na fonte obteve-se o valor de 9,93%, novamente nota-se que a resposta do filtro é rápida e logo estabiliza a corrente da fonte. A Figura 44 contempla as correntes obtidas na simulação, sendo  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $I_{fa}$  a corrente do filtro híbrido.

Na Tabela 19 são expostos os valores harmônicos individuais até a 13ª ordem, apesar de a tabela não contemplar, neste caso houve uma inserção de harmônica de 2ª ordem, o que pode tornar o uso do filtro desinteressante.

Figura 44 - Correntes do Caso 7



Fonte: O próprio autor

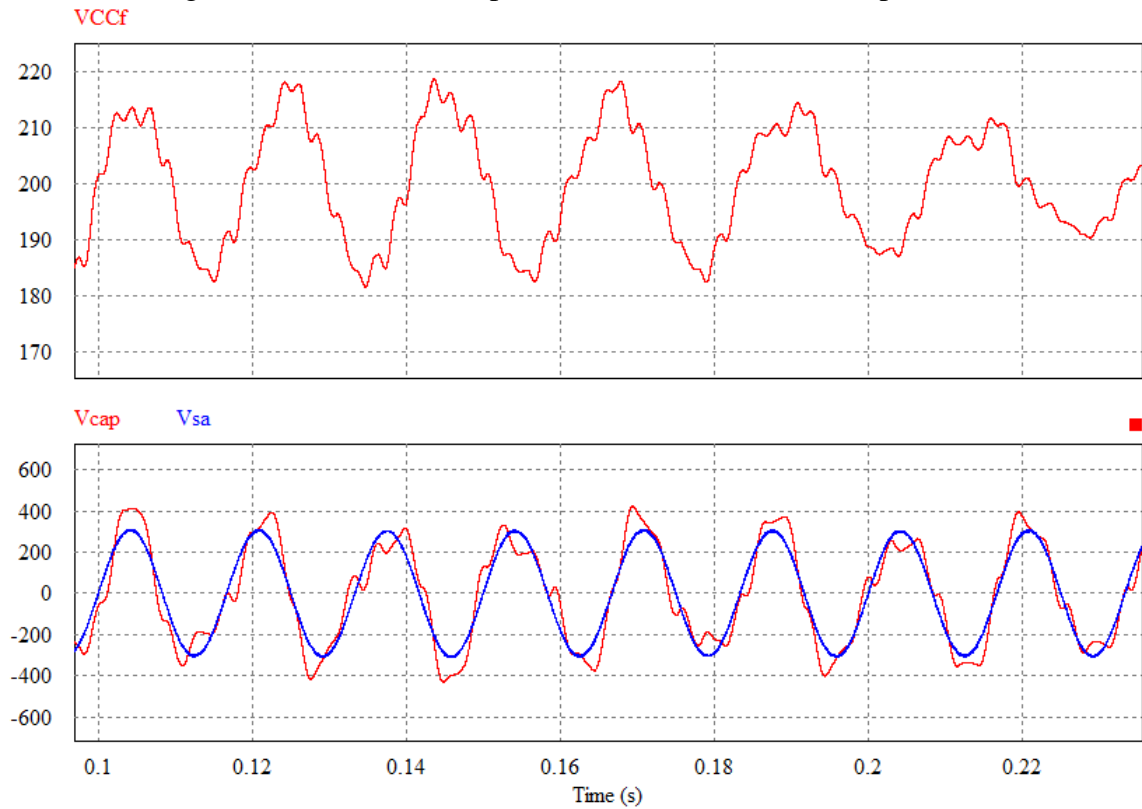
Tabela 19 – Correntes harmônicas operando um inversor sob carga

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	54,6	100	50,9	100
5	6,74	12,3	1,82	3,57
7	3,53	6,46	0,16	0,31
11	0,34	0,62	0,13	0,25
13	0,91	1,66	0,27	0,53

Fonte: O próprio autor

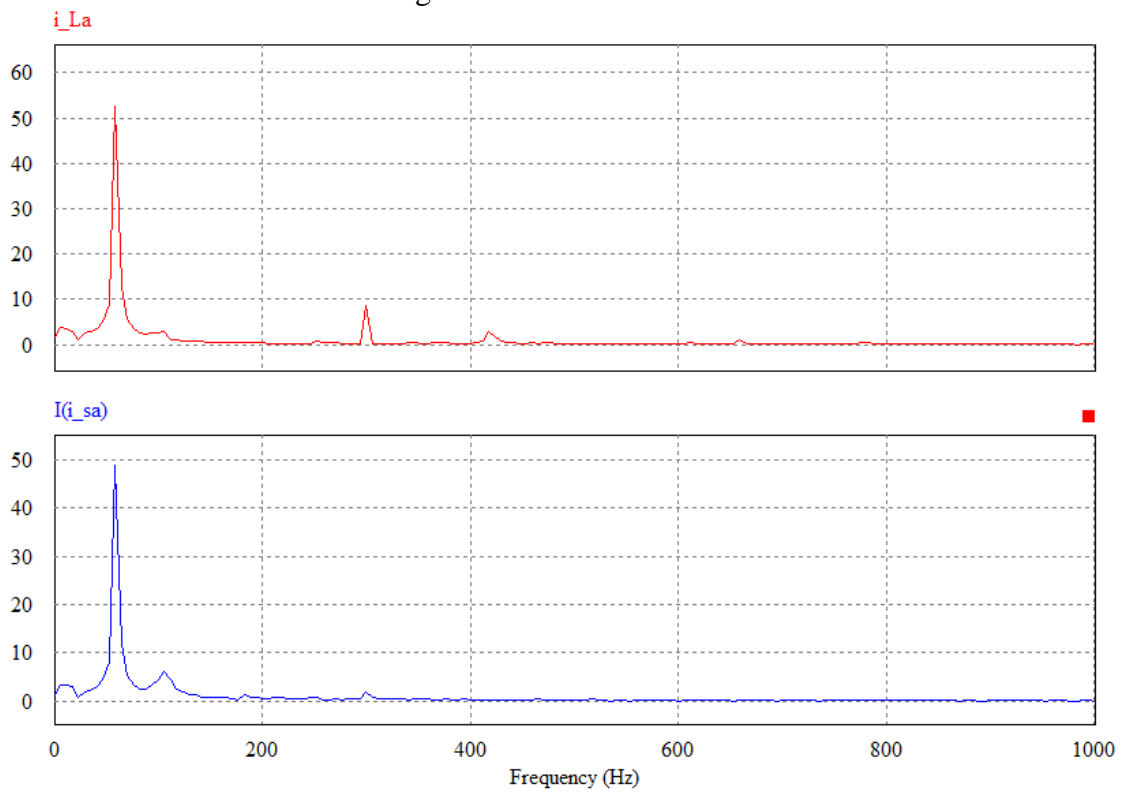
Também pode-se observar a grande variação da tensão no link CC do filtro a qual oscilou em torno de 20% do valor dado como referência. No primeiro gráfico da Figura 45 observa-se estas variações na tensão do capacitor e no segundo gráfico é mostrada a tensão no capacitor de acoplamento. Porém, conforme visto na Figura 46, o filtro gerou um pico de 6,4A, o que representa cerca de 12%, em torno da harmônica de segunda ordem e um pico de 1,3A na de terceira ordem.

Figura 45 - Tensões no capacitor do link CC e no de acoplamento



Fonte: O próprio autor

Figura 46 - FFT do Caso 7



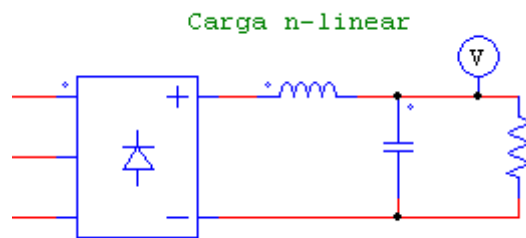
Fonte: O próprio autor

## 5.8 FILTRO INDUTIVO NO LINK DC - CASO 8

Neste caso serão avaliadas três condições de funcionamento com o filtro de linha indutivo posicionado no link CC da carga. Tal solução pode ser financeiramente mais viável, devido a redução do número de indutores no circuito de carga.

O circuito de carga da Figura 47 será variado de forma a obter característica predominantemente resistiva, após predominância capacitiva e finalmente indutiva. Avaliar-se-á a compensação fornecida pelo filtro, haja vista que nesta configuração as derivadas de corrente são maiores quando comparadas a filtragem indutiva no lado CA.

Figura 47 - Carga não linear com filtro indutivo no link CC



Fonte: O próprio autor

Quando este tipo de carga é predominantemente resistiva a corrente segue a forma de onda da tensão retificada, 6 pulsos. Para tal foram escolhidos  $R = 10\Omega$ ,  $L = 30\mu H$  e  $C = 15pF$ . Na Figura 48 são representadas as formas de onda de corrente para esta configuração de carga, onde é notório que as altas derivadas de corrente solicitadas pela carga geram *notch* de tensão conforme pode ser visto na Figura 49. O controle do filtro não tem velocidade suficiente para compensar essas mudanças abruptas na corrente e, portanto, há surtos de corrente na fonte.

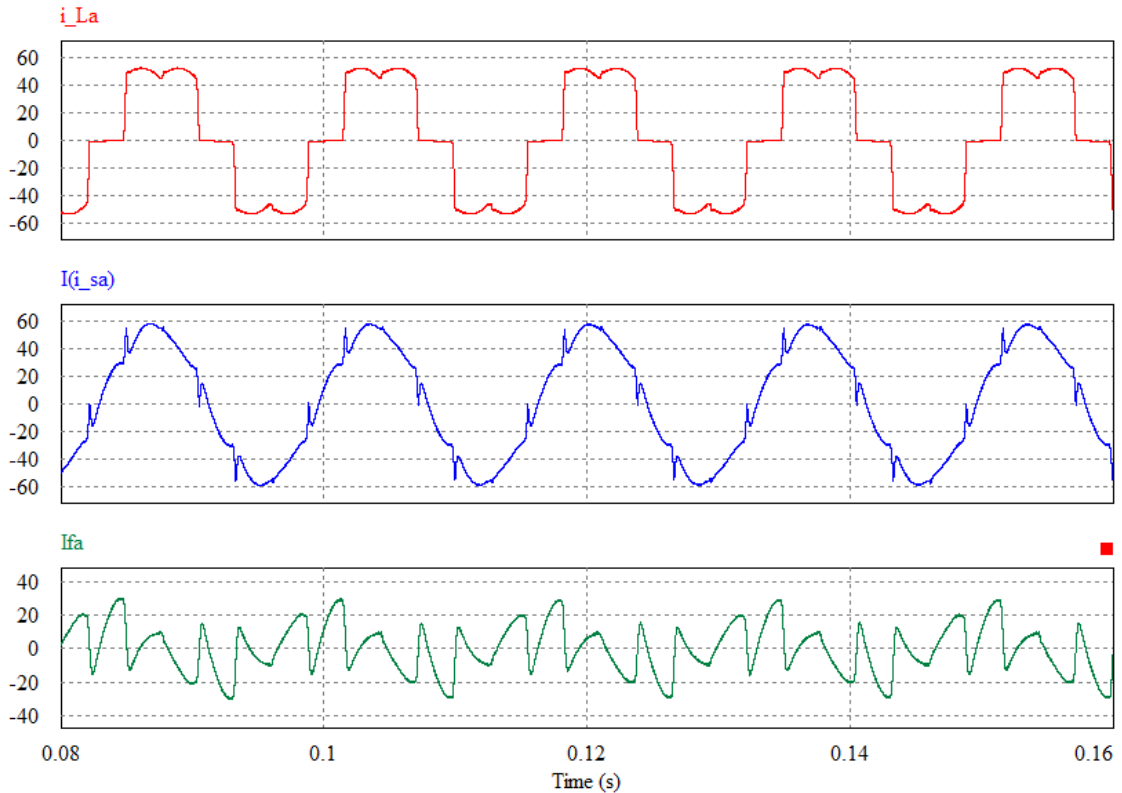
Na Tabela 20 são descritas as harmônicas individuais sendo que para esta configuração a DHTi da carga é de 29,2% e foi reduzida, pela ação do filtro, a 9,22% na fonte.

Tabela 20 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	51,1	100	51,7	100
5	12,9	25,2	1,72	3,32
7	4,65	9,09	0,52	1,00
11	4,79	9,37	1,11	2,14
13	2,83	5,53	0,98	1,89

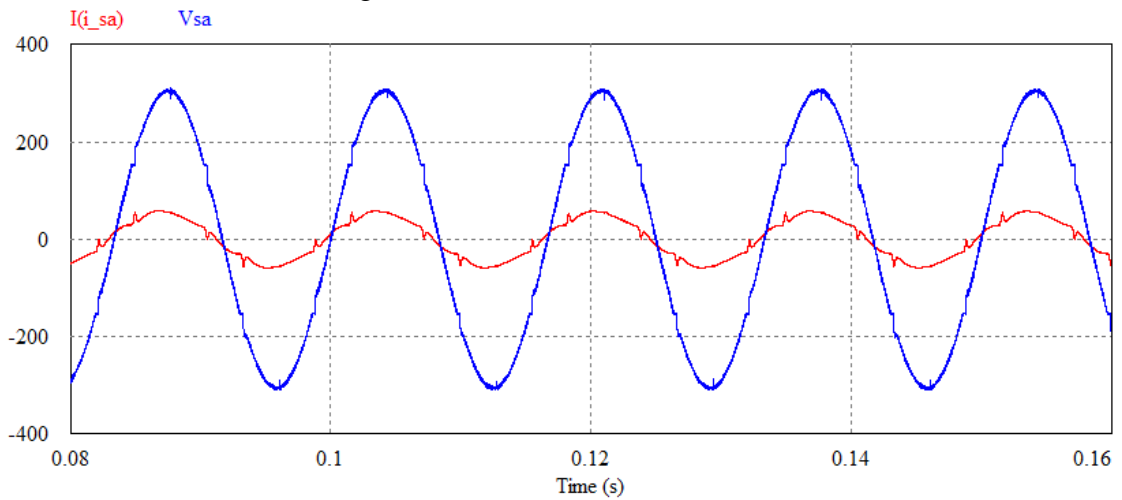
Fonte: O próprio autor

Figura 48 - Característica predominante resistiva



Fonte: O próprio autor

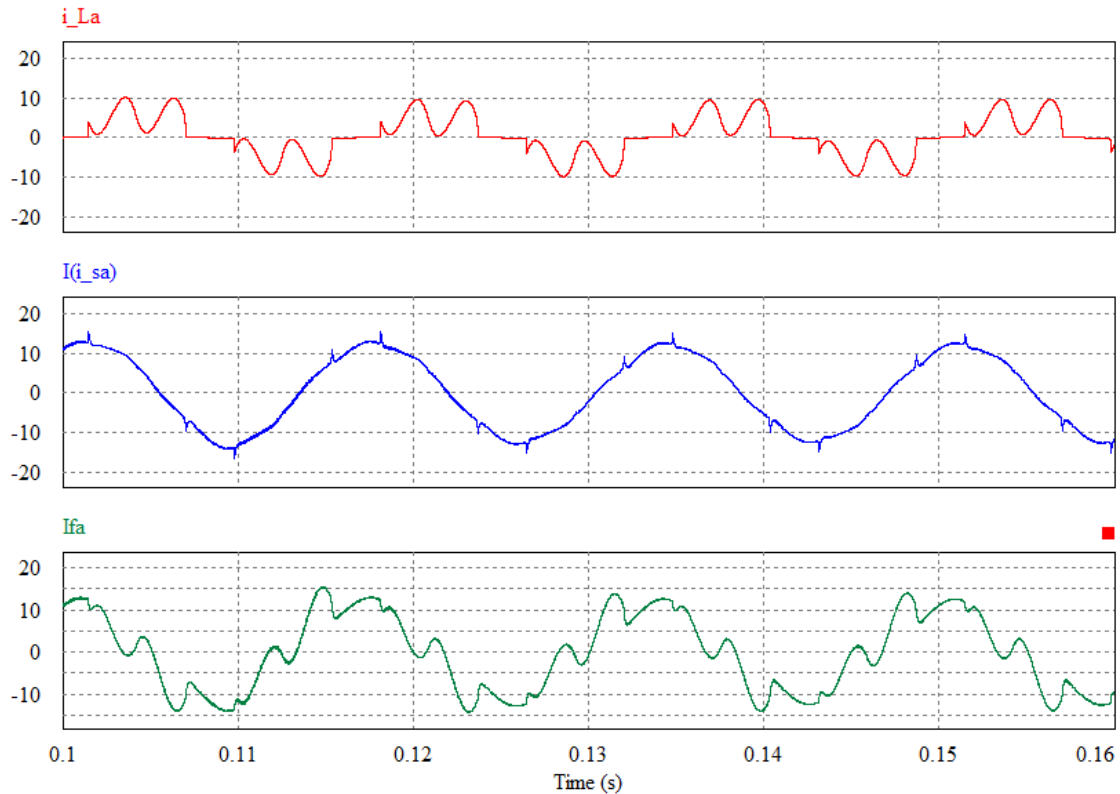
Figura 49 - Notch de tensão da fonte



Fonte: O próprio autor

Para avaliar a carga com predominância capacitiva foram alterados os parâmetros da carga sendo  $R = 100\Omega$ ,  $L = 3mH$  e  $C = 1500\mu F$ . As formas de onda obtidas estão contempladas na Figura 50, sendo  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $Ifa$  a corrente do filtro híbrido.

Figura 50 - Carga predominantemente capacitiva



Fonte: O próprio autor

Nestas condições foi obtida a DHTi da carga como 68,8% e valor obtido com a aplicação do filtro foi de 5,62%. Os valores dos harmônicos individuais são descritos na Tabela 21 e conforme a Tabela 7, o funcionamento é aceitável, dentro dos limites estabelecidos.

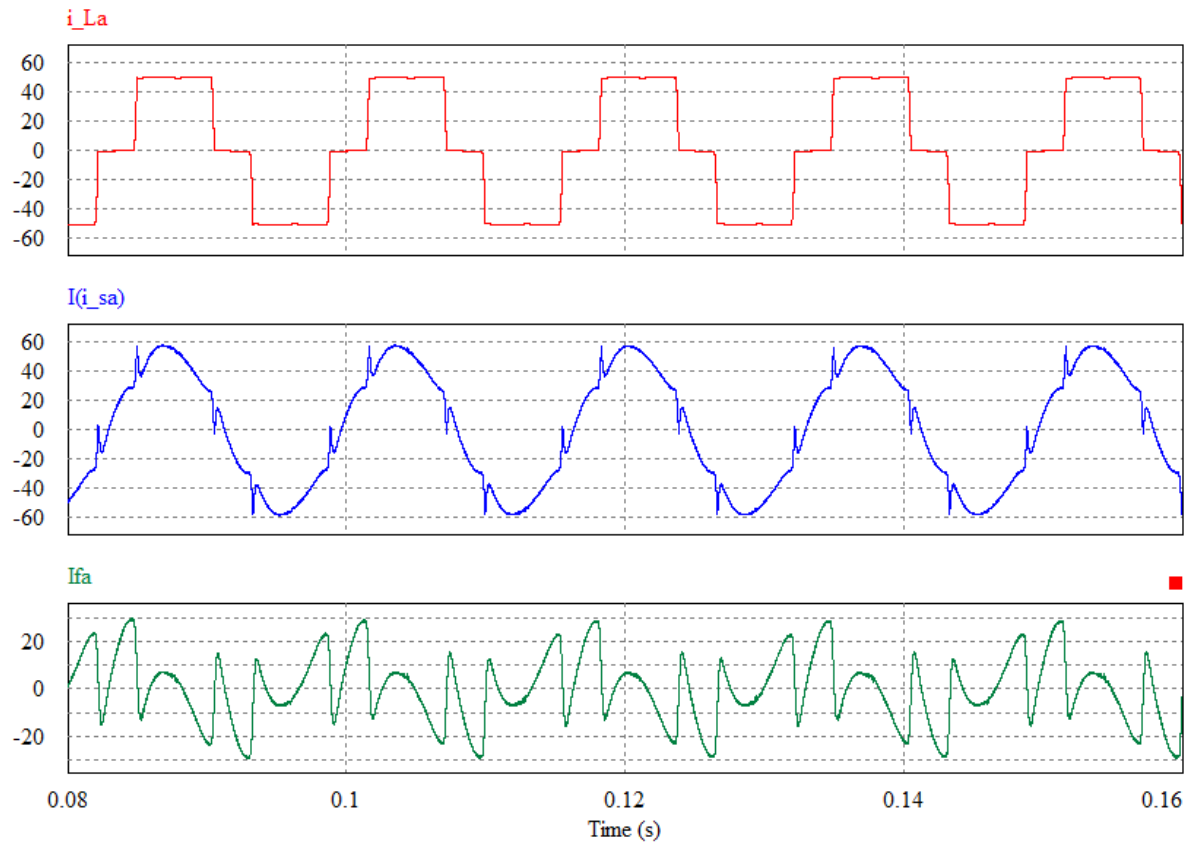
Tabela 21 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	10,1	100	9,95	100
5	3,00	29,7	0,99	9,94
7	2,12	20,9	0,39	3,91
11	0,38	3,76	0,26	2,61
13	0,58	5,74	0,25	2,51

Fonte: O próprio autor

Finalmente, para uma carga predominantemente indutiva tem-se uma corrente de carga quase-quadrada sendo que a DHTi da carga, fornecida pelo PSIM, é de 31,05% e o da fonte como 8,70%. As formas de onda obtidas estão contempladas na Figura 51, sendo  $i_{La}$  a corrente demandada pelas cargas,  $I(i_{sa})$  a corrente fornecida pela fonte e  $Ifa$  a corrente do filtro híbrido.

Figura 51 – Carga predominantemente indutiva



Fonte: O próprio autor

A Tabela 22 contempla os valores dos harmônicos individuais sendo que, novamente, o controle do filtro não tem velocidade suficiente para compensar essas mudanças abruptas na corrente e, portanto, há surtos de corrente na fonte. Entretanto a capacidade de filtragem foi efetiva.

Tabela 22 – Correntes harmônicas com filtro indutivo no link CC

Harmônico	Carga (A)	$I_h/I_1$ %	Fonte (A)	$I_h/I_1$ %
1	51,0	100	51,5	100
5	11,6	22,7	1,43	2,77
7	5,73	11,2	0,30	0,58
11	4,79	9,39	1,20	2,33
13	3,23	6,33	1,15	2,23

Fonte: O próprio autor

## 6. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A motivação deste trabalho teve início em um problema real, sendo assim o estudo de qualidade de energia, normatizações e sistemas de filtragem foram de suma importância para alcançar o entendimento básico sobre aspectos de funcionamento e aplicação de filtros ativos em sistemas de potência. Notavelmente é um assunto muito complexo e requer muito estudo para compreender uma aplicação, que ao primeiro olhar pode parecer simples.

Em relação a qualidade de energia pode-se perceber que este tema ainda precisa ser muito discutido no Brasil, ressaltando-se a questão das harmônicas que ainda não tem normatização. A ANEEL apresenta recomendações porém não há maior controle aos clientes. Em pesquisa no sítio da ANEEL pode-se notar que em muitos quesitos de qualidade de energia ainda há coleta de dados para futura regulamentação.

Das normativas internacionais, a IEC 61000-3-2 preocupa-se com os limites harmônicos para cada equipamento, tendendo a limitar a circulação das harmônicas dentro da planta. Já para a IEEE *std* 519, o interesse são a totalidade das harmônicas no PAC, abrangendo um sistema maior.

A partir dos estudos bibliográficos sobre sistemas de filtragem concluiu-se que os filtros passivos são mais baratos que filtros ativos, porém a performance dos filtros passivos depende das condições a qual o filtro está submetido. Os filtros passivos podem alterar suas características com a temperatura e também com a variação da carga, sendo que em certas operações podem entrar em ressonância amplificando a circulação de harmônicas. Chegou-se ao resultado que, para alguns casos, o maior preço do filtro ativo compensa pelo fato da maior confiabilidade e resposta dinâmica.

Para o filtro híbrido constatou-se que a ligação em série com o filtro passivo aumenta a capacidade de absorção das harmônicas. O filtro ativo funciona como uma impedância variável e altera a impedância equivalente do PAC, criando um caminho alternativo para as frequências que deseja-se eliminar da fonte.

A utilização do filtro passivo em série com o filtro ativo, conectados em paralelo ao sistema permitem uma queda de tensão necessária para baixar o nível de potência do filtro ativo para cerca de 10% da potência da carga. Tais considerações são importantes pois reduzem o custo do filtro dado que esse isolamento proporcionado pelo filtro passivo suprime o uso do transformador proposto em outras topologias.



Nas simulações de carga em um ambiente industrial obteve-se êxito na aplicação do filtro. Foi visto a eficiência deste filtro através das simulações propostas, como no Caso 8, Figura 50, onde a redução da DHTi chegou a 80%.

Um dos motivos da funcionalidade obtida é que foi considerada a impedância de um transformador real e a potência do filtro é baixa frente ao circuito no qual foi proposta sua conexão. Entretanto, em alguns casos o filtro atuou de forma a obter valores abaixo do menor valor recomendado pela IEEE *std* 519: validando o bom funcionamento.

Considerando os custos da implementação, é necessário cercar-se de informações para evitar gastos desnecessários. Ao final do trabalho conclui-se que o projeto é tecnicamente viável, porém não foi estudado nenhum aspecto de proteção do filtro híbrido ou mesmo do sistema. Além disso, seria interessante compará-lo a outro sistema de filtragem e avaliar qual é tecnicamente e financeiramente mais viável.

Como sugestão para trabalhos futuros:

Pode ser agregado ao controle um limitador de corrente com a função de prevenir sobrecargas no filtro passivo quando exposto a altos índices harmônicos. Ou até mesmo controlar a corrente apenas para a harmônica de sintonia do filtro passivo, para que não haja sobrecorrentes que comprometam o sistema de filtragem.

Também poderiam ser propostas melhorias na estratégia de controle da parte do controle CC do conversor afim de evitar picos de corrente no capacitor quando o filtro é conectado ao sistema.

Pode-se propor a mudança o filtro sintonizado simples por um banco de filtros passivos (pensando no custo benefício) e realocar o controle de *feedforward* em outra frequência.

Outra opção seria um filtro sintonizado duplo, com sintonia na quinta e décima primeira harmônica, haja vista que nessa configuração (dependendo do fator de qualidade) terá baixa impedância também para a sétima harmônica.

## REFERÊNCIAS

ACHA, Enrique et al. Power electronic control in electrical systems. Londres: Newnes, 2002, 443 p. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=O\\_T81gC-GzcC&pg=PA261&dq=active+power+filters&hl=pt-BR&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=harmonic&f=false](https://books.google.com.br/books?id=O_T81gC-GzcC&pg=PA261&dq=active+power+filters&hl=pt-BR&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=harmonic&f=false)>. Acesso em: 12 out. 2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. 2016. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_7.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf)>. Acesso em: 08 set. 16

\_\_\_\_\_. **Relatório técnico 1/8**: revisão bibliográfica: regulamentos e normas nacionais e internacionais e principais pesquisas já realizadas no Brasil e no exterior. 2014. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta\\_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica\\_0105\\_SRD-Anexo%20I%20Relat%C3%B3rio\\_1\\_FINAL.pdf](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/consulta_publica/documentos/Nota%20T%C3%A9cnica_0105_SRD-Anexo%20I%20Relat%C3%B3rio_1_FINAL.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2016.

AKAGI, Hirofumi. The state-of-the-art of active filters for power conditioning. In: European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2005, Dresden. **Paper...** Tokyo: Tokyo Institute of Technology, 2005. p. 1-15.

ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. **Power System Harmonics**. 2. ed. England: John Wiley & Sons, 2003. 399 p. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=1h9aqRj4o8EC&pg=PA234&lpg=PA234&dq=double+tuned+filter+impedance&source=bl&ots=uE84zTYTsJ&sig=XfzsuBHywE6pCbBZGMHJa90vEfA&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwiXn8qhoLjQAhULiJAKHVdxDd8Q6AEIXTAL#v=onepage&q=double%20tuned%20filter%20impedance&f=false>>. Acesso em: 27 out. 2016.

AZEVEDO, Christian Cesar de. **Controle adaptativo robusto para filtros ativos de potência paralelo**. 2011. 235 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Natal, 2011.

BANGIA, Sakshi; SHARMA, P. R.; GARG, Maneesha. Comparison analysis of shunt active filter and transformerless parallel hybrid active filter. In: International Conference on Artificial Intelligence, Soft Computing, (18-20) 2013, Bangalore. **Paper...** Faridabad: YMCA University Of Science and Technology, 2013. p. 373-382.

BOLLEN, M. H.J. What is power quality? **Electric Power Systems Research Journal**. [S.l], Jul. 2003, volume 66, Issue 1. p. 5-14.

BRASIL, Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996. Institui a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, disciplina o regime das concessões de serviços públicos de energia elétrica e dá outras providências. Brasília, 1996. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/lei19969427.pdf>>. Acesso em: 23 out. 2016.

BRASIL, Decreto n° 2.335, de 06 de outubro de 1997. Constitui a Agência Nacional de Energia Elétrica -ANEEL, autarquia sob regime especial, aprova sua Estrutura Regimental e o Quadro Demonstrativo dos Cargos em Comissão e Funções de Confiança e dá outras providências. Brasília, 1997. Disponível em:

<[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/d2335.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2335.HTM)>. Acesso em: 23 out. 2016.

CHENG, Po-Tai; BHATTACHARYA, Subhashish; DIVAN, Deepak M. **Hybrid solutions for improving passive filter performance in high power applications**. Madison: IEEE. p. 911-917. 1996.

CUTRI, Rodrigo. **Compensação de desequilíbrios de carga empregando conversor estático operando com modulação em largura de pulso**. 2004. 23 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 2004.

DIAS, Guilherme Alfredo Dentzien. **Harmônicas em sistemas industriais**. 2. ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002. 284p. Disponível em:

<[https://books.google.com.br/books?id=tdq\\_dQPWZqIC&pg=PA120&dq=normas+perturba%C3%A7%C3%A3o+sistema+de+pot%C3%Aancia&hl=pt-BR&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=normas%20perturba%C3%A7%C3%A3o%20sistema%20de%20pot%C3%Aancia&f=false](https://books.google.com.br/books?id=tdq_dQPWZqIC&pg=PA120&dq=normas+perturba%C3%A7%C3%A3o+sistema+de+pot%C3%Aancia&hl=pt-BR&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=normas%20perturba%C3%A7%C3%A3o%20sistema%20de%20pot%C3%Aancia&f=false)>. Acesso em: 23 out. 2016.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Distorção harmônica: causas, efeitos, soluções e normas**. São Paulo, 2011. 42 p. Disponível em:

<<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a5.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2016.

DUGAN, Roger C. et al. **Electrical power systems quality**. 2. ed. New York, US: McGraw-Hill, 2004. 521p.

FERRACCI, Philippe. **Power Quality**. [S.I]: Schneider Electric, 2001. 36 p. (Cahier Technique n° 199, Technical Collection).

GARCIA, Flávio Resende. **Harmônicos em sistemas elétricos de potência**. [S.I]: Iesa; Inepar, [21--?]. 50p. Disponível em:

<[http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf\\_reativa/ap\\_harmonicosSEPCap.pdf](http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosSEPCap.pdf)>. Acesso em: 19 out. 2016.

GONZALEZ, Manuel Losada Y et al. **Distorções harmônicas geradas por algumas cargas não lineares com tensões senoidais**. Minas Gerais, 2012. Disponível em:

<<http://www.swge.inf.br/anais/sbse2012/PDFS/ARTIGOS/96931.PDF>>. Acesso em 26 set. 2016

HALPIN, S. Mark; CARD, Angela. **Power electronics handbook: devices, circuits and applications**. Editor chefe: Muhammad H. Rashid. 3 ed. Pensacola: Elsevier, 2011. 1390 p.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, IEEE Recommended Practices for Harmonic Control in Electric Power System, IEEE 519, 1992.

KLEMPKA, Ryszard; HANZELKA, Zbigniew; VARETSKY, Yuri. In: \_\_\_\_\_. **Bank harmonic filters operation in power supply system: cases studies**. Editado por Ahmed Zobaa. [S.I]: InTech, 2013. p. 201-230. Disponível em: <<http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/44197.pdf>>. Acesso em: 27 out.2016.

LAMICH, M. et al. **New structure for three phase four wires hybrid active filters**. Terrassa: IEEE. p. 1603-1608. 2006.

LANDER, Cyril W. **Power Eletronics**. 3. ed. Berkshire: McGraw-Hill, 1993. 480p.

LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo. **Harmônicos em sistemas elétricos**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014. 376 p. Disponível em:

<<https://books.google.com.br/books?id=NtNeAwAAQBAJ&pg=PT20&dq=qualidade+da+energia+elet+rica&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKewj77ZLZx6jQAhXDG5AKHWUIC-EQ6AEISTAG#v=onepage&q=qualidade%20da%20energia%20elettrica&f=false>>. Acesso em: 11 de out. 2016.

LEE, Tzung-Lin et al. Hybrid active filter with variable conductance for harmonic resonance suppression in industrial power systems. **IEEE Transactions on Industrial Eletronics**, v. 62, n°. 2, fev. 2015. p. 746-756.

MELO, Priscila Facco de. **Projeto e implementação de um filtro ativo universal trifásico controlado digitalmente**. 2010. 145 f. Dissertação (Mestrado em Ciências – Área de Concentração: Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Curitiba, 2010.

MORÁN, Luis A. et al. Using active power filters to improve power quality. **IEEE Transactions on**, v. 40, 2004. p. 232-241.

MOUCO, Arthur do Carmo. **Um filtro híbrido de potência para conexão em redes elétricas de alta tensão sem transformadores**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2011.

PAULILO, Gilson. Capítulo I: conceito gerais sobre qualidade da energia. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 84, p. 28-35, Jan. 2013. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84\\_fasc\\_qualidade\\_energia\\_cap1.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf)>. Acesso em: 15 out. 2016.

PAULILO, Gilson; TEIXEIRA, Mateus Duarte. Capítulo II: harmônicos: conceitos. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 85, p. 34-42, Fev. 2013. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed85\\_fasciculo\\_qualidade\\_ca\\_p2.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed85_fasciculo_qualidade_ca_p2.pdf)>. Acesso em: 06 out. 2016.

PIRES, Igor Amariz. Capítulo XII: medidas de mitigação de harmônicos. **O Setor Elétrico**, São Paulo, ed. 59, p. 38-47, Dez. 2010. Disponível em: <[http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed59\\_fasc\\_harmonicos\\_capXI1.pdf](http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed59_fasc_harmonicos_capXI1.pdf)>. Acesso em: 22 set. 2016

POMÍLIO, José Antenor. Capítulo 2: normas relativas a fator de potência e distorção harmônica. **O Setor Elétrico**, São Paulo, p. 18-23, Abr. 2006. Disponível em: <<http://www.tlacapacitores.com.br/adm/paginas/manuais/images/noticias/Normas-Relativas-a-fator-de-potencia-e-distorcao-de-harmonicas/normas-relativas-a-fator-de-potencia-e-distorcao-harmonicas.pdf>>. Acesso em: 21 out. 2016.

RASHID, Muhammad. H. **Eletrônica de Potência: Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. 2 ed. São Paulo: Makron Books, 1999.

RIBEIRO, Enio Roberto. **Filtros ativos série para a compensação de harmônicas de tensão**. 2003. 224 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica - Área de Eletrônica de Potência e Acionamento Elétrico) - Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2003.

RODRIGUES, Augusto Marconcin. **Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa**. 2009. 11 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2009. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/38.pdf>> Acesso em: 19 out. 2016.

SARMANHO, Uiraçaba Abaetê Solano. **Influência dos distúrbios elétricos em média tensão na qualidade de energia - estudo em um ambiente universitário**. 2005. 377 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <[http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/Tese/QEE/Qualidade\\_de\\_Energia\\_Eletrica.pdf](http://www.feng.pucrs.br/~fdosreis/ftp/Tese/QEE/Qualidade_de_Energia_Eletrica.pdf)>. Acesso em 24 out. 2016.

SINGH, Bhim; CHANDRA, Ambrish; AL-HADDAD, Kamal. **Power quality: problems and mitigation techniques**. Reino Unido: John Wiley & Sons, 2015, 596 p. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?redir\\_esc=y&hl=pt-BR&id=Tb7eBQAAQBAJ&dq=active+power+filters&q=harmonic#v=onepage&q=active%20power%20filters&f=false](https://books.google.com.br/books?redir_esc=y&hl=pt-BR&id=Tb7eBQAAQBAJ&dq=active+power+filters&q=harmonic#v=onepage&q=active%20power%20filters&f=false)>. Acesso em: 12 out. 2016.

SRIANTHUMRONG, Sunt; AKAGI, Hirofumi. A medium-voltage transformerless AC/DC power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 39, n.º. 3, mai./jun. 2003. p. 874-882.

SRIVASTAVA, R. K. et al. **Proceedings of all India seminar on advances in product development (APD-2006)**. India: New Age International, 2006, 620 p. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=N9GeioEKQ5UC&pg=RA5-PA14&dq=harmonic+distortion+power+filter&hl=pt-BR&sa=X&redir\\_esc=y#v=onepage&q=harmonic%20distortion%20power%20filter&f=false](https://books.google.com.br/books?id=N9GeioEKQ5UC&pg=RA5-PA14&dq=harmonic+distortion+power+filter&hl=pt-BR&sa=X&redir_esc=y#v=onepage&q=harmonic%20distortion%20power%20filter&f=false)>. Acesso em: 12 out. 2016.

THREE-PHASE harmonic filter: implement four types of three-phase harmonic filters using RLC componentes. United States: MathWorks, 2016. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/phymod/sps/powersys/ref/threephaseharmonicfilter.html>>. Acesso em: 04 out. 2016.

WONG, Man-Chung; DAI, Ning-Yi; LAM, Chi-Seng. **Parallel power electronics filters in three-phase four-wire systems: principle, control and design.** Singapura: Springer, 2016, 275 p. Disponível em:  
<[https://books.google.com.br/books?id=Yf16DAAAQBAJ&pg=PA59&dq=active+power+filter&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwif\\_NGOptbPAhVCS5AKHSAWB4MQ6AEIZjAH#v=onepage&q=active%20power%20filter&f=false](https://books.google.com.br/books?id=Yf16DAAAQBAJ&pg=PA59&dq=active+power+filter&hl=pt-BR&sa=X&ved=0ahUKEwif_NGOptbPAhVCS5AKHSAWB4MQ6AEIZjAH#v=onepage&q=active%20power%20filter&f=false)>. Acesso em: 12 out. 2016.

ZAVERI, Naimish; CHUDASAMA, Ajitsinh. Analysis of different real time reference generation techniques used for harmonic mitigation in three phase shunt active filters. **International Journal of Recent Trends in Engineering**, India, Nov. 2009. Issue on Electrical & Electronics - Short Papers. p. 123-126. Disponível em:  
<<http://ijrte.academypublisher.com/vol02/no07/ijrte0207123126.pdf>>. Acesso em: 01 out. 2016.

## ANEXO A – Laplace $F(s + j\omega)$

Seja  $x(t)$  um sinal de entrada e  $y(t)$  um sinal de saída em um sistema linear com função de transferência  $G(s)$  no eixo estacionário. A transformação de Laplace de  $y(t)$  é dada pela equação (A.1).

$$\mathcal{L}\{y(t)\} = Y(s) = G(s)X(s) \quad (\text{A.1})$$

onde  $X(s)$  é a transformada de Laplace de  $x(t)$ .

A entrada  $x(t)$  e a saída  $y(t)$  podem ser transformadas em um eixo rotativo com frequência angular  $\omega$  através da multiplicação por  $e^{-j\omega t}$ . As equações (A.2) e (A.3) denotam os sinais no eixo rotativo.

$$X'(s) = \mathcal{L}\{e^{-j\omega t} x(t)\} \quad (\text{A.2})$$

$$Y'(s) = \mathcal{L}\{e^{-j\omega t} y(t)\} \quad (\text{A.3})$$

Então, obtém-se que,  $Y'(s) = G'(s)X'(s)$ , sendo  $G'(s)$  a função de transferência do eixo rotativo. Através das propriedades de Laplace tem-se a equação (A.4).

$$\mathcal{L}\{e^{-j\omega t} x(t)\} = X(s + j\omega) \quad (\text{A.4})$$

Sendo  $\mathcal{L}\{x(t)\} = X(s)$ , e tendo que as relações acima são validas para um sistema linear, resultando na equação (A.5).

$$\mathcal{L}\{e^{-j\omega t} y(t)\} = G(s + j\omega)X(s + j\omega) = G(s + j\omega)X'(s) \quad (\text{A.4})$$

Finalmente tem-se a prova que a função de transferência no eixo rotativo resulta na equação (A.5).

$$G'(s) = G(s + j\omega) \quad C. Q. D. \quad (\text{A.5})$$

## ANEXO B – Série de Fourier

Uma onda não senoidal, segundo Lander (1993), pode ser descrita por uma onda complexa expressa matematicamente pela equação (B.1), abaixo.

$$v = V_0 + V_1 \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_2 \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_n \text{sen}(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{B.1})$$

onde  $v$  é o valor instantâneo no tempo  $t$

$V_0$  é a componente de valor médio ou CC

$V_1$  é a amplitude máxima da componente fundamental

$V_2$  é a amplitude máxima da segunda harmônica

$V_n$  é a amplitude máxima da  $n$ ésima harmônica

$\varphi$  é a referência angular relativa

$\omega = 2\pi f$ , onde  $f$  é a frequência fundamental de oscilação

Alternativamente, esta série pode ser expressa como visto na equação (B.2) que é conhecida como Série de Fourier e  $f(x)$  pode ser expressa, matematicamente, pelos coeficientes de Fourier, conforme as equações (B.3), (B.4) e (B.5).

$$y = f(x) = A + a_1 \text{sen}(x) + a_2 \text{sen}(2x) + \dots + a_n \text{sen}(nx) + b_1 \cos(x) + b_2 \cos(2x) + \dots + b_n \cos(nx) \quad (\text{B.2})$$

$$A = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \quad (\text{B.3})$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \text{sen}(nx) dx \quad (\text{B.4})$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (\text{B.5})$$

Comparando as equações (B.1) e (B.2), pode-se inferir que, por similaridade obtemos a equação (B.6), resultando na equação da amplitude (B.7) e na equação da fase (B.8).

$$a_n \text{sen}(n\omega t) + b_n \cos(n\omega t) = V_n \text{sen}(n\omega t + \varphi_n) \quad (\text{B.6})$$

$$V_n = (a_n^2 + b_n^2)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{B.7})$$

$$\varphi_n = \arctan\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad (\text{B.8})$$

De acordo com Lander (1993), é possível fazer algumas simplificações na análise da onda complexa e, por inspeção, pode-se inferir que:

- a. Se a área dos semicírculos positivo e negativo forem iguais, o coeficiente  $A$  é nulo.
- b. Se  $f(\omega t + \pi) = -f(\omega t)$ , não existirão harmônicas pares
- c. Se  $f(-\omega t) = -f(\omega t)$ , então o coeficiente  $b_n = 0$
- d. Se  $f(-\omega t) = f(\omega t)$ , então o coeficiente  $a_n = 0$