

**FERNANDO DA CRUZ POLL**

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA EM BAIXA TENSÃO: ESTUDO  
DE CASO EM UM AMBIENTE UNIVERSITÁRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, do curso de Engenharia Elétrica da Fundação Universidade Federal do Pampa.

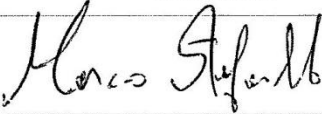
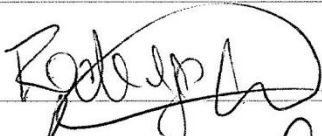
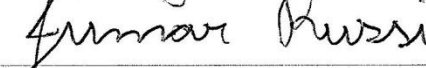
Orientador: Prof. Dr. Márcio Stefanello

**ALEGRETE  
2013**

**Autoria:** Fernando da Cruz Poll

**Título:** Análise da Qualidade de Energia Elétrica em baixa tensão: estudo de caso em um ambiente universitário

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como parte das atividades para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa.

<b>Os componentes da banca de avaliação, abaixo listados, consideram este trabalho aprovado.</b>				
	<b>Nome</b>	<b>Titulação</b>	<b>Assinatura</b>	<b>Instituição</b>
<b>1</b>	Márcio Stefanello	Dr.		Unipampa
<b>2</b>	Rodrigo Padilha Vieira	Dr.		Unipampa
<b>3</b>	Jumar Luís Russi	Dr.		Unipampa

**Data da aprovação:** 06 de março de 2013.

*“Dedico este trabalho a minha família  
pelo carinho, educação e apoio dado a mim.”*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço em especial à minha família pelo carinho, compreensão, e aos anos de dedicação que foram fundamentais para que eu me tornasse quem sou hoje.*

*Agradeço aos professores da Unipampa Campus Alegrete pela dedicação e excelência em ensino, em especial ao professor Marcio Stefanello pelo apoio e dedicação.*

*Cada sonho que você deixa para trás, é um  
pedaço do seu futuro que deixa de existir.*

***Steve Jobs***

## RESUMO

Atualmente o estudo da qualidade de energia elétrica é um tópico de grande interesse, tanto para a comunidade científica quanto para a indústria. Neste sentido, as distorções harmônicas de tensão e corrente são características do sistema elétrico que merecem atenção especial, pois a circulação destas pode produzir interações com vários componentes instalados provocando perturbações no sistema elétrico local e em sistemas adjacentes, comprometendo o funcionamento de equipamentos eletrônicos. O trabalho apresenta uma revisão geral sobre as distorções harmônicas e soluções para minimizar estes distúrbios, seguido de um estudo de caso em um ambiente universitário com base em medições realizadas em um período de quatro meses. Após a análise dos dados fornecidos pelo medidor de qualidade de energia, foi realizada a modelagem da carga no simulador PSIM e obtidos resultados de simulação com um filtro ativo paralelo. Para compensação das harmônicas de corrente é utilizado um filtro ativo paralelo com geração de referências baseada na Teoria da Potência Instantânea, apresentando um resultado satisfatório referente à redução dos níveis de harmônicos, desbalanceamento e compensação de potência reativa.

Palavras-chave: distorções harmônicas, qualidade de energia elétrica, filtro, Teoria p-q;

## **ABSTRACT**

Currently the study of electric power quality is a topic of great interest for both the scientific community and industry. In this sense, the harmonics distortions are voltage and current characteristics of the electrical system that deserve attention especially because circulation can produce these interactions with various components installed causing disturbances in the electrical system on site and adjacent systems, compromising the functioning of electronic equipment. The paper presents a general review of the harmonic distortions and solutions to minimize these disturbances, followed by a case study in a university environment based on measurements taken over a period of four months. After analyzing the data provided by the power quality meter, was performed modeling the load on PSIM simulator and simulation results obtained with a parallel active filter. To compensate for current harmonics is used parallel with an active filter based generation references Instantaneous Power Theory, presenting a satisfactory result for the reduction of the levels of harmonics, unbalance and reactive power compensation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Afundamento de tensão.....	19
Figura 1.2: Elevação de Tensão.....	21
Figura 1.3: Interrupção de tensão. ....	21
Figura 1.4: Influência das distorções harmônicas. (a) Componente fundamental (60 Hz); (b) Quinto harmônico (300 Hz); (c) Sétimo harmônico (420 Hz); (d) Resultante da soma da fundamental com as harmônicas.....	24
Figura 2.1: Diagrama de blocos do filtro ativo paralelo.....	34
Figura 2.2: Fluxo das potências instantâneas .....	36
Figura 2.3: Geração das correntes de referência com base na teoria p-q .....	38
Figura 2.4: Esquema simplificado do filtro ativo paralelo conectado à rede .....	39
Figura 2.5: Fluxo das potências instantâneas com o filtro em funcionamento .....	40
Figura 3.1: Analisador de Qualidade de Energia Fluke 1750 .....	42
Figura 3.2: Comportamento da tensão de linha.....	43
Figura 3.3: Afundamento de tensão ocorrido durante as medições.....	44
Figura 3.4: Interrupção de Tensão.....	45
Figura 3.5: Variação de Frequência durante todo período de análise .....	46
Figura 3.6: Perfil das correntes durante todo período de estudo .....	47
Figura 3.7: Potência ativa consumida durante o monitoramento. ....	48
Figura 3.8: Potência Aparente consumida durante o monitoramento. ....	48
Figura 3.9: Potência Reativa consumida durante o monitoramento.....	49
Figura 3.10: Fator de potência.....	50
Figura 3.11: Formas de onda das tensões de linha no momento de maior THD <sub>v</sub> .....	51
Figura 3.12: Espectro das distorções harmônicas de tensão.....	53
Figura 3.13: Espectro da distorção harmônica individual de corrente .....	56
Figura 3.14: Momento mais crítico da THD <sub>i</sub> .....	57



Figura 4.1: Carga modelada no software Psim.....	63
Figura 4.2: Espectro de corrente da carga modelada.....	63
Figura 4.3: Espectro da carga real, com base nos valores da Tabela 4.1. ....	64
Figura 4.4: Filtro ativo paralelo.....	64
Figura 4.5: Esquema implementado no Psim para geração de referências .....	65
Figura 4.6: Fontes de corrente substituindo o FAP .....	66
Figura 4.7: Correntes de referência quando a carga é linear (60Hz) e balanceada. ....	67
Figura 4.8: Correntes nas 3 fases, com a carga modelada.....	67
Figura 4.9: Comportamento da corrente de neutro com o filtro em operação .....	68
Figura 4.10: Fator de Potência.....	69
Figura 4.11: Inversor PWM.....	69
Figura 4.12: Circuito equivalente do controle do inversor.....	71
Figura 4.13: Diagrama de blocos da técnica de controle.....	73
Figura 4.14: Técnica de controle .....	74
Figura 4.15: Formação dos pulsos de comando com modulação PWM .....	75
Figura 4.16: Projeto do filtro ativo paralelo .....	76
Figura 4.17: correntes nas 3 fases.....	76
Figura 4.18: correntes nas 3 fases sem a compensação do FAP .....	77
Figura 4.19: Corrente nas 3 fases com a compensação do FAP.....	77
Figura 4.20: Corrente de neutro.....	78
Figura 4.21: Espectro das correntes da linha sem o filtro .....	78
Figura 4.22: Espectro das correntes da linha com o filtro .....	79
Figura 4.23: Potências Ativa e Reativa fornecidas pela fonte.....	82
Figura 4.24: Potência Ativa e Reativa fornecidas pelo filtro .....	83
Figura 4.25: Fator de potência.....	83
Figura 4.26: Correntes de linha compensadas .....	85

Figura 4.27: Espectro das correntes de linha sem a compensação do FAP.....	85
Figura 4.28: Espectro das correntes de linha com a compensação do FAP .....	86
Figura 4.29: Fator de potência.....	87

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 .....	20
TABELA 1.2 .....	27
TABELA 1.3 .....	28
TABELA 1.4 .....	28
TABELA 3.1 .....	43
TABELA 3.2 .....	45
TABELA 3.3 .....	47
TABELA 3.4 .....	49
TABELA 3.5 .....	51
TABELA 3.6 .....	52
TABELA 3.7 .....	55
TABELA 3.8 .....	55
TABELA 3.9 .....	56
TABELA 4.1 .....	62
TABELA 4.2 .....	62
TABELA 4.3 .....	80
TABELA 4.4 .....	81
TABELA 4.5 .....	84
TABELA 4.6 .....	84
TABELA 4.7 .....	86

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

FAP- Filtro ativo paralelo;

pu- Sistema por unidade;

K- Fator de desequilíbrio de tensão;

TDD- Distorção harmônica total de demanda;

THD- Distorção harmônica total;

ANEEL- Agência nacional de energia elétrica;

DTHTS95%- Distorção harmônica total em 95% do tempo registrado;

VSI – Inversor fonte de tensão;

P95% - Valor medido em 95% do tempo monitorado;

PI – Proporcional integral

## SUMÁRIO

<b>Agradecimentos</b> .....	<b>4</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>6</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>7</b>
<b>Lista de Figuras</b> .....	<b>8</b>
<b>Lista de tabelas</b> .....	<b>11</b>
<b>Lista de abreviaturas e siglas</b> .....	<b>12</b>
<b>Sumário</b> .....	<b>13</b>
<b>Introdução</b> .....	<b>15</b>
<b>1 Qualidade de energia elétrica</b> .....	<b>18</b>
1.1 <i>Variações de Tensão</i> .....	19
1.1.1 Afundamento de tensão (Sag) .....	19
1.1.2 Elevação de Tensão (Swell) .....	20
1.1.3 Interrupção de tensão .....	21
1.1.4 Desequilíbrio de Tensão .....	22
1.2 <i>Varição de Frequência</i> .....	22
1.3 <i>Distorções Harmônicas</i> .....	23
1.3.1 Indicadores Harmônicos.....	24
1.3.1.1 Distorção Harmônica Total (THD) .....	24
1.3.1.2 Distorção Total de Demanda (TDD) .....	25
1.3.2 Normas Regulamentadoras .....	26
1.3.2.1 Norma IEC std. 61000.....	26
1.3.2.2 Procedimento de Rede – Submódulo 2.8 - ANEEL .....	26
1.3.2.3 Recomendação IEEE std. 519-1992.....	27
1.3.3 Equipamentos Geradores de distorções harmônicas .....	29
1.3.3.1 Lâmpadas Fluorescentes .....	29
1.3.3.2 Computadores e outros equipamentos de informática .....	30
1.3.3.3 Equipamentos industriais .....	30
1.3.4 Equipamentos e componentes sensíveis aos harmônicos .....	31
1.3.5 Conclusões Parciais .....	31
<b>2 Filtros para Compensação de Distúrbios</b> .....	<b>32</b>
2.1 <i>Filtro Passivo</i> .....	33
2.2 <i>Filtro Ativo</i> .....	33
2.3 <i>Filtro Ativo Paralelo (FAP)</i> .....	34
2.3.1 Teoria p-q.....	35

2.3.1 Utilização da Teoria p-q para geração das correntes de referência .....	37
2.4 <i>Conclusões Parciais</i> .....	40
<b>3 Análise da qualidade da energia elétrica - Estudo de caso em um ambiente universitário.....</b>	<b>41</b>
3.1 <i>Medição</i> .....	41
3.2 <i>Análise das Tensões</i> .....	43
3.2.1 Afundamentos e Elevações de Tensão .....	44
3.2.2 Interrupções de tensão.....	44
3.2.3 Desequilíbrio de Tensão.....	45
3.3 <i>Variações de frequência</i> .....	46
3.4 <i>Análise das correntes</i> .....	46
3.5 <i>Análise das Potências</i> .....	48
3.5.1 Fator de Potência .....	49
3.6 <i>Distorções harmônicas</i> .....	50
3.6.1 Distorção harmônica de tensão .....	50
3.6.2 Distorção harmônica de corrente .....	53
3.7 <i>Conclusões Parciais</i> .....	57
<b>4 Modelagem do sistema e resultados de simulação .....</b>	<b>59</b>
4.1 <i>Modelagem do sistema</i> .....	59
4.1.1 Modelagem da linha .....	59
4.1.2 Modelagem da carga.....	60
4.2 <i>Projeto do Filtro Ativo Paralelo</i> .....	64
4.2.1 Geração das correntes de referência.....	65
4.2.2 Circuito de potência do filtro ativo paralelo .....	69
4.2.3 Controle do filtro ativo paralelo .....	70
4.3 <i>Resultados de Simulação</i> .....	75
4.3.1 Simulação para um perfil da carga diferente .....	83
4.4 <i>Conclusões Parciais</i> .....	87
<b>Considerações finais .....</b>	<b>88</b>
<b>Referências bibliográficas.....</b>	<b>90</b>

## INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica é um tópico de grande relevância dada as características das cargas encontradas na indústria, no comércio e nas residências. O uso intensivo de cargas não lineares tais como computadores, inversores de frequência, *no breaks*, retificadores, entre outros equipamentos eletrônicos tem levado os níveis de distorções harmônicas a valores não aceitáveis para uma operação de qualidade do sistema. Distorções harmônicas elevadas resultam na queda de produtividade, reduzem a vida útil de equipamentos podendo até danificá-los em alguns casos. Cargas desequilibradas e retificadores monofásicos causam corrente excessiva no neutro. Estes e outros fatores evidenciam que o estudo da qualidade de energia é de extrema importância, para assim chegar a soluções para tais distúrbios.

Esta pesquisa demonstra, com base em medições periódicas, que um ambiente universitário possui um grande número de cargas não lineares que prejudicam a qualidade da energia elétrica. Portanto o principal objetivo da pesquisa é realizar a modelagem da carga com base nas medições realizadas e desenvolver o projeto de um filtro ativo paralelo para solucionar os principais problemas de qualidade de energia.

O levantamento de dados para a análise quantitativa da qualidade de energia é um tema de grande relevância tanto para a instituição quanto para a concessionária de energia elétrica, pois o consumidor deve atender aos limites impostos pelas normas existentes e a concessionária necessita garantir uma maior eficiência no seu trabalho de geração e distribuição de energia.

Neste trabalho foram analisados os principais indicadores de qualidade de energia elétrica, com foco nas distorções harmônicas geradas por cargas não lineares presentes em um ambiente universitário e avaliada a necessidade de correção das distorções harmônicas geradas. O trabalho apresenta em geral uma revisão sobre os principais indicadores de qualidade de energia elétrica, seguido de um estudo de caso em um ambiente universitário. A planta escolhida para realizar este estudo foi o prédio acadêmico da Universidade Federal do Pampa, localizado no município de Alegrete, RS.

O problema em questão trata-se dos distúrbios de tensão e corrente do sistema elétrico analisado, principalmente as distorções harmônicas. Para realizar o estudo sobre a planta elétrica foi utilizado um medidor de qualidade de energia elétrica (FLUKE 1750), instalado no

lado de baixa tensão do transformador da subestação do prédio em questão. Após ter sido realizada a análise dos dados fornecidos pelo medidor, verificou-se que os índices de distorções harmônicas de corrente ultrapassaram os limites impostos pelas normas, então, por meio de simulação, o objetivo foi encontrar soluções para compensar estas correntes indesejadas. A solução escolhida foi a utilização de um filtro ativo paralelo, para isto, foi realizada a modelagem da carga no *software Psim* para implementação do filtro na rede e realização das simulações.

A metodologia do trabalho está apresenta a seguir:

- Primeiramente foi realizada a revisão bibliográfica referente à qualidade de energia elétrica e soluções para compensar os principais distúrbios de tensão e corrente;
- Medições de campo foram realizadas em um período de quatro meses, desde outubro de 2010 até janeiro de 2011;
- Realizada a análise dos dados, verificou-se que as harmônicas de corrente ultrapassaram os limites impostos pelas recomendações e o fator de potência não estava em um limite aceitável. Portanto foram propostas soluções para estes problemas;
- A solução mais eficiente para minimizar harmônicos é a implementação de filtros, para isso foi necessária a modelagem da carga, na qual foi realizada no *software Psim*;
- A carga foi modelada por uma parcela linear e outra não linear. Utilizando a corrente média na frequência de 60 Hz, foi modelada a impedância da carga e as harmônicas foram representadas por fontes de corrente em paralelo nas demais frequências, onde cada ordem harmônica foi representada por uma fonte de corrente com seu respectivo valor de pico fornecido pelo medidor;
- Com a carga modelada, a próxima etapa foi a implementação do filtro. O filtro escolhido foi o filtro ativo paralelo.

O trabalho está organizado em quatro capítulos. No primeiro capítulo, é realizada uma breve introdução sobre alguns indicadores de qualidade de energia elétrica. Posteriormente o assunto discutido são as distorções harmônicas onde são abordadas as normas pertinentes, os principais indicadores e alguns equipamentos que geram estas distorções. No segundo capítulo são discutidos os métodos de compensação harmônica, correção do fator de potência e desbalanceamento. Neste capítulo são abordados os filtros passivos e ativos com ênfase no filtro ativo paralelo e na Teoria da Potência Instantânea utilizada para a geração de referências para



a malha de controle de corrente do FAP (filtro ativo paralelo). No terceiro capítulo são apresentados resultados de um estudo de caso num ambiente universitário a fim de obter dados para a modelagem de uma carga real. Foram obtidos resultados com base em quatro meses de medições. São analisados os distúrbios de tensão e corrente, com ênfase na análise das distorções harmônicas. Com base nas medições realizadas, foi verificado que alguns indicadores de qualidade de energia não estavam dentro dos limites aceitáveis. Assim, no quarto e último capítulo foi realizada a modelagem da carga, e posteriormente foi projetado um filtro ativo paralelo para compensação das harmônicas, correção do fator de potência e minimização do desbalanceamento entre as fases. Ao final do capítulo são apresentados os resultados de simulação.

## 1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

Este capítulo apresenta os principais conceitos relacionados à qualidade de energia elétrica com ênfase nas distorções harmônicas. Inicialmente são apresentados os indicadores relacionados à qualidade da energia elétrica e na sequência o conceito de distorções harmônicas é descrito, bem como seus principais indicadores, equipamentos que geram estas distorções e equipamentos sensíveis a estes distúrbios.

O termo “Qualidade de Energia” pode ser definido como sendo um conjunto de características necessárias para que a energia elétrica seja entregue ao consumidor com continuidade e qualidade, ou seja, o sinal entregue deve ter amplitude e frequência constantes e forma de onda senoidal.

Na academia, o tema qualidade de energia elétrica está sendo abordado por vários autores da área por sua grande importância, pois com a evolução da tecnologia eletrônica, muitos equipamentos que vem sendo inseridos no mercado drenam correntes harmônicas da rede elétrica.

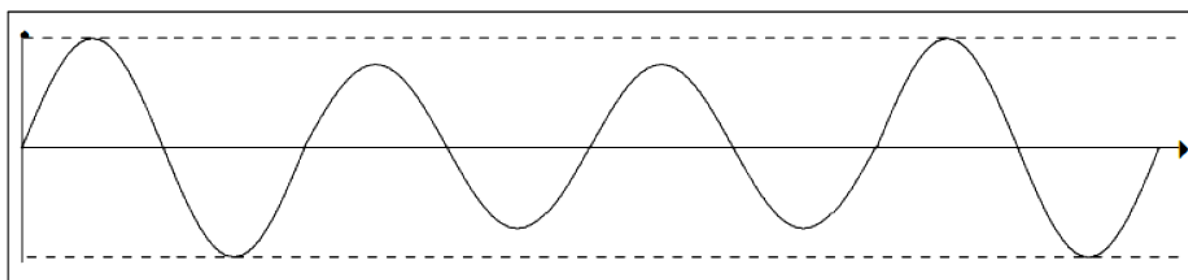
Dadas as características das cargas dominantes em indústrias e residências até algumas décadas atrás, a qualidade de energia não era um tema de grande relevância se comparado com o panorama atual. Entretanto, as cargas cada vez mais incorporam dispositivos semicondutores tais como retificadores. Além de produzirem distorções, estas cargas são sensíveis a perturbações na rede elétrica, necessitando de características particulares na tensão de alimentação para seu perfeito funcionamento. Portanto, a sensibilidade dos equipamentos às variações na forma de onda recebida, o uso de equipamentos com maior eficiência energética e com maior número de componentes não lineares, e a conscientização dos clientes em relação à qualidade do serviço prestado pelas concessionárias, são alguns dos fatores que fundamentam o estudo da qualidade da energia elétrica.

## 1.1 Variações de Tensão

As variações de tensão são classificadas em variações de curta duração, com tempo de ocorrência máximo de até 1 minuto, e variações de longa duração. Variações de curta duração são, na maioria das vezes, causadas pela energização de grandes cargas que consomem uma elevada corrente de partida. Dependendo da localização da falha e das condições em que o sistema elétrico se encontra, a falha pode causar sobretensões, subtensões, interrupções, entre outros fenômenos. Segundo [1], variações de longa duração consideram desvios de tensão na frequência da rede elétrica, por períodos maiores que 1 minuto. Estas variações podem estar associadas a interrupções, sobretensões e subtensões e normalmente são causadas pelo chaveamento no sistema e variações de grandes cargas.

### 1.1.1 Afundamento de tensão (Sag)

Segundo descrito na norma brasileira [1], o fenômeno de afundamento de tensão é definido como sendo uma variação de tensão de curta duração. Conforme tabela 1.1, os afundamentos de tensão são classificados como temporários e momentâneos. Os afundamentos temporários tem duração de 3 segundos à 3 minutos, com variação de superior ou igual a 1 pu e inferior a 0,9 pu, enquanto que os afundamentos momentâneos tem duração entre 1 ciclo a 3 segundos.



Fonte: Modelagem e análise do efeito de distorções harmônicas de computadores em sistemas de energia, (2011).

Figura 1.1 Afundamento de tensão.

TABELA 1.1

Classificação das variações de tensão de curta duração.

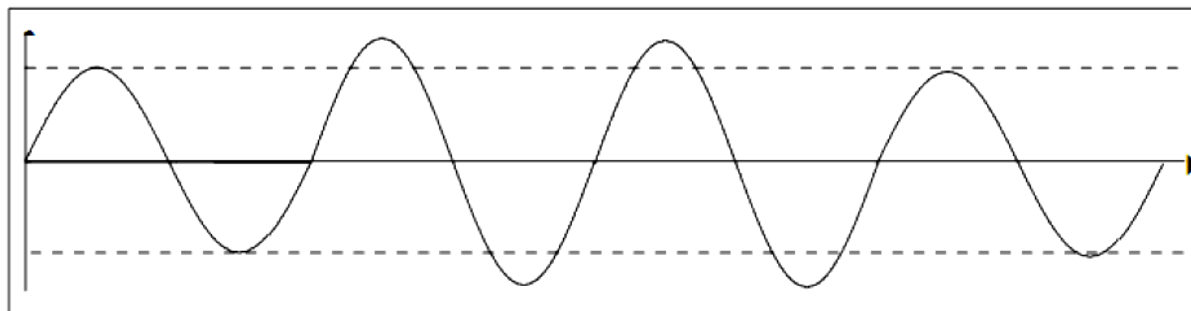
<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração do Evento</b>	<b>Amplitude da Tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea De Tensão	Interrupção Momentânea de tensão	Inferior ou igual a 3 segundos	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Momentânea de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior ou igual a 0,9 pu
	Elevação Momentânea de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 3 segundos	Superior a 1,1 pu
Variação Temporária De Tensão	Interrupção Temporária de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 1 minuto	Inferior a 0,1 pu
	Afundamento Temporária de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 1 minuto	Superior ou igual a 0,1 pu e inferior ou igual a 0,9 pu
	Elevação Temporária de tensão	Superior ou igual a 1 ciclo e inferior ou igual a 1 minuto	Superior a 1,1 pu

Fonte: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST, (2008).

A medição e a análise dos afundamentos de tensão são de extrema relevância, pois as cargas em geral possuem uma tolerância restrita às variações da tensão de alimentação.

### 1.1.2 Elevação de Tensão (Swell)

O fenômeno de elevação de tensão é caracterizado pelo aumento da tensão de alimentação acima dos limites impostos pelas normas, sendo que sua duração não deve ultrapassar dois segundos. Caso a duração da elevação de tensão seja maior que dois segundos, o distúrbio é considerado como sobretensão. A Figura 1.2 descreve uma elevação de tensão:

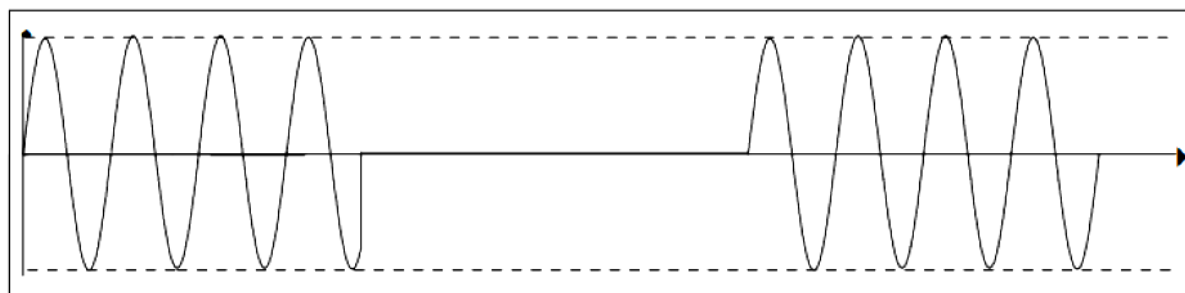


Fonte: Modelagem e análise do efeito de distorções harmônicas de computadores em sistemas de energia, (2011).

Figura 1.2: Elevação de Tensão.

### 1.1.3 Interrupção de tensão

A interrupção de tensão é caracterizada pela ausência total de tensão, ou valores abaixo de 0,1 pu que podem ocorrer por alguns milissegundos chegando a vários minutos. Segundo [1], as interrupções de tensão são divididas em três níveis: Interrupção momentânea, onde o intervalo de tempo de ausência de tensão é de 5 a 30 ciclos; Interrupção temporária onde o tempo é de 31 ciclos a 3 segundos; E interrupções de longa duração, com tempo superior à 3 segundos. A Figura 1.3 representa uma interrupção de tensão:



Fonte: Modelagem e análise do efeito de distorções harmônicas de computadores em sistemas de energia, (2011).

Figura 1.3: Interrupção de tensão.

Normalmente os problemas relacionados com variações de tensão são devido ao aumento brusco de corrente, seja por curto-circuitos ou por entrada de grandes cargas no sistema. Essas cargas ocasionam uma queda de tensão devido à grande corrente consumida na partida, geralmente essas elevadas correntes de partida persistem até as cargas entrarem em regime permanente ou atuar a proteção.

### 1.1.4 Desequilíbrio de Tensão

O desequilíbrio ou desbalanceamento de tensão está diretamente associado à incorreta distribuição das cargas entre as fases do sistema, e é caracterizado pela diferença dos valores de tensão de uma instalação elétrica.

O indicador referente ao desequilíbrio de tensão nos barramentos dos transformadores de potência e nos barramentos da rede básica é o fator  $K$ , que corresponde ao fator de desequilíbrio de tensão. Este fator é dado pela relação entre as componentes de sequência negativa e sequência positiva da tensão, expresso em porcentagem da componente de sequência positiva conforme Equação 1.1:

$$K = \frac{V_-}{V_+} * 100\% \quad (1.1)$$

Onde:

$V_+$  = componente de sequência positiva da tensão;

$V_-$  = componente de sequência negativa da tensão.

Como descrito na Equação 1.1, o fator  $K$  de desequilíbrio é calculado com base no método das componentes simétricas, também conhecido como teorema de Fortescue. Este método consiste na decomposição de um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados, ou seja, qualquer sistema de vetores trifásicos desequilibrados pode ser resolvido com a adição de três sistemas equilibrados, que são: Componente de sequência positiva, componente de sequência negativa e componente de sequência zero.

Conforme [1], os agentes devem manter suas instalações operando de forma equilibrada, de acordo com o limite individual estabelecido para os pontos de conexão à rede básica ou a barramentos dos transformadores de fronteira. O fator de desequilíbrio de tensão não deve exceder o valor de 1,5% considerando a equação (1.1).

## 1.2 Variação de Frequência

As perturbações de frequência geralmente estão associadas a problemas na geração e transmissão de energia elétrica. Segundo a norma internacional [4], as variações de frequência não podem exceder o limite de variação de 1 Hz, ou seja, no caso do Brasil, os limites aceitáveis para geração de energia são de 59 Hz à 61 Hz. Caso a frequência não se encontre dentro deste limite, pode causar danos a alguns equipamentos.

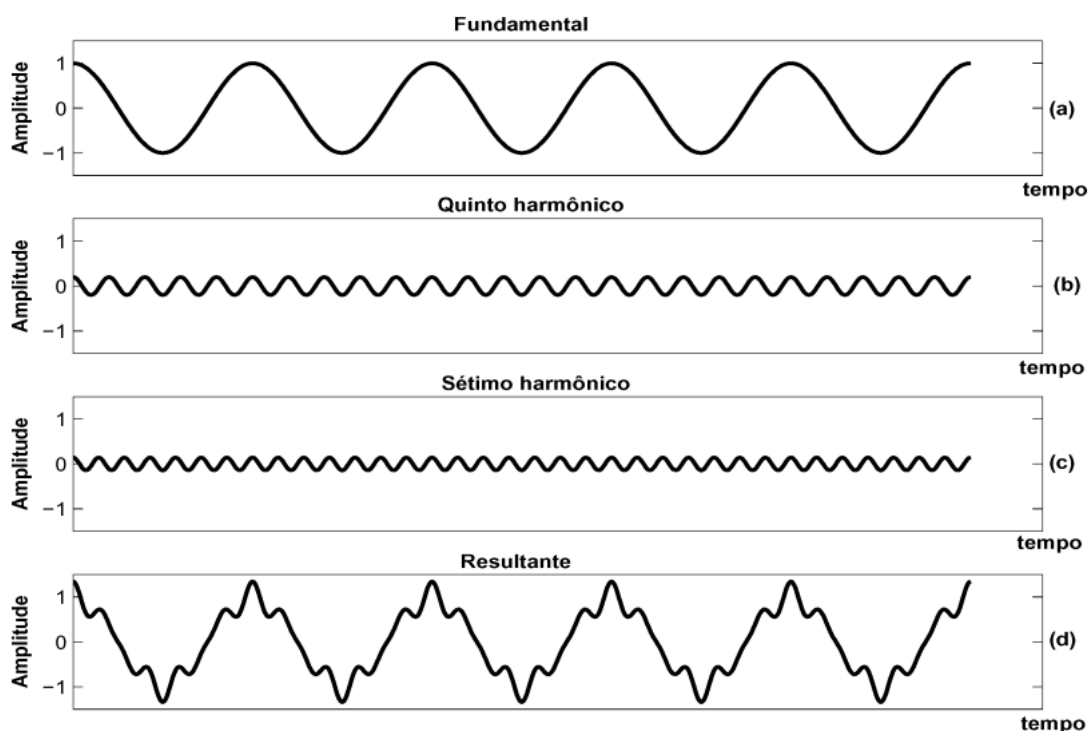
### 1.3 Distorções Harmônicas

De acordo com o matemático e físico francês Fourier, uma determinada forma de onda pode ser sintetizada por meio de um somatório de componentes senoidais de frequência múltipla do sinal original. Então qualquer outra forma de onda que não seja a senoidal pura é uma composição de infinitas formas de ondas senoidais, com isso a primeira é conhecida como forma de onda fundamental e as demais são múltiplas da fundamental, conhecidas como harmônicas.

No geral, as harmônicas são ondas de amplitude menor do que a fundamental e frequências múltiplas da fundamental que aparecem quando a fundamental não é senoidal pura. Essas distorções surgem devido à existência de cargas não lineares na rede elétrica de distribuição. Estas cargas se diferenciam das lineares por que não possuem uma relação linear entre corrente e tensão e são normalmente geradas por equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem componentes não lineares como diodos, transistores e outros. Estas cargas não lineares absorvem uma corrente diferente da forma de onda da tensão que a alimenta, com isso gera uma perturbação na onda da corrente. Como exemplo de cargas não lineares, podemos citar:

- 1) os equipamentos industriais (máquinas de solda,...);
- 2) os inversores de frequência para motores assíncronos ou motores em corrente contínua;
- 3) os equipamentos de escritório (computadores, máquinas copiadoras, fax,...);
- 4) os aparelhos domésticos (TV, forno micro-ondas, iluminação,...);
- 5) os *no-breaks*.

Na Figura 1.4, está ilustrada, respectivamente, a forma de onda fundamental, sua quinta harmônica, sétima harmônica, e ao final a onda resultante da soma das três ondas. Nota-se uma forma de onda resultante bastante deformada.



Fonte: Fluxo Harmônico em planta comercial na presença de grupo gerador, (2010).

Figura 1.4: Influência das distorções harmônicas. (a) Componente fundamental (60 Hz); (b) Quinto harmônico (300 Hz); (c) Sétimo harmônico (420 Hz); (d) Resultante da soma da fundamental com as harmônicas.

As harmônicas de ordem ímpar são as que causam maior distorção na onda da corrente e quanto menor sua frequência, maior a distorção causada.

### 1.3.1 Indicadores Harmônicos

Os componentes harmônicos causam problemas de qualidade de energia elétrica. Por isso é necessário que se tenha normas para regulamentar estas distorções. As normas asseguram o nível máximo de harmônicos que são tolerados. Para isso foi necessária a criação de indicadores para a análise e quantificação dos efeitos das distorções harmônicas. Os principais indicadores são [6]: A distorção total de demanda (TDD) e a distorção harmônica total (THD), que é o indicador mais utilizado para quantificar harmônicos, sendo adotado como parâmetro por uma das principais referências mundiais [4].

#### 1.3.1.1 Distorção Harmônica Total (THD)

Este é o indicador mais utilizado para quantificar harmônicos. A THD representa a distorção devida a todos os harmônicos presentes em um sinal. É definida como sendo uma por-



centagem da frequência fundamental. A THD de tensão e a THD de corrente são dadas pelas Equações (1.2) e (1.3), respectivamente:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_l} \quad (1.2)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_l} \quad (1.3)$$

Onde:

$h$  – número inteiro (ordem harmônica);

$V_h$  – valor rms da componente de tensão harmônica  $h$ ;

$V_l$  – valor rms de tensão fundamental;

$I_h$  – valor rms da componente de corrente harmônica  $h$ ;

$I_l$  – valor rms de corrente fundamental.

### 1.3.1.2 Distorção Total de Demanda (TDD)

Este indicador é utilizado para quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga e é utilizado pela recomendação [2]. A formulação é bastante similar à THD, porém a diferença é que a distorção total de demanda é calculada em relação à corrente máxima de carga e a distorção harmônica total é calculada em relação à corrente fundamental no horário da medição. A TDD tem como resultado um valor completo, pois leva em consideração a corrente máxima, assim se o valor encontrado for elevado, conclui-se que há elevada circulação de harmônicas naquele sistema [7].

A TDD é calculada conforme Equação (1.5):

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_l} \quad (1.4)$$

Em que:

$I_l$ - Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema;

$I_h$ -Valor rms da componente de corrente harmônica  $h$ .

### 1.3.2 Normas Regulamentadoras

As distorções harmônicas afetam diretamente a qualidade de energia elétrica fornecida aos consumidores, pois podem afetar a operação de outros equipamentos conectados à rede elétrica. Com a qualidade de energia afetada, o sistema elétrico como um todo é afetado pelo fato de haver milhões de equipamentos gerando harmônicas e poluindo a rede pública.

Para ter o controle destas distorções, foram estabelecidas normas e recomendações limitando a emissão de harmônicas na rede. As principais normas e recomendações são:

- Norma IEC std. 61000 [4];
- Procedimento de Rede (ANEEL) – Submódulo 2.8 [1];
- Guia IEEE std. 519-1992 [2];

#### 1.3.2.1 Norma IEC std. 61000

A norma IEC std. 61000-3-2 limita a emissão de harmônicas por equipamentos eletrônicos e elétricos de baixa potência, com corrente de entrada menor que 16A por fase, classificando os equipamentos em quatro categorias:

- 1) Classe A – Equipamentos trifásicos equilibrados e qualquer outro equipamento não pertencente às classes B,C e D;
- 2) Classe B – Equipamentos portáteis;
- 3) Classe C – Equipamentos de iluminação (incluindo “dimmerizados”);
- 4) Classe D – Equipamentos com o formato da corrente de entrada incomum e com potência ativa inferior a 600 W.

Para cada categoria são estabelecidos limites de harmônicos diferentes, conforme IEC 61000-3-2.

Para equipamentos conectados à rede com corrente maior que 16A por fase e menor que 75A, a norma correspondente é a IEC std. 61000-3-4.

#### 1.3.2.2 Procedimento de Rede – Submódulo 2.8 - ANEEL

O procedimento de rede da ANEEL corresponde à norma vigente no Brasil referente à qualidade de energia elétrica, incluindo harmônicos. Esta norma estabelece limites somente para distorções harmônicas de tensão.

O indicador para avaliar o desempenho global quanto a harmônicos de tensão, em regime permanente, nos barramentos da rede básica e nos barramentos dos transformadores de fronteira, corresponde à distorção de tensão harmônica. Os valores do indicador de distorção total (DTHTS95%) e os indicadores de harmônicos individuais, conforme Tabela 1.2, são obtidos da seguinte maneira, conforme [1]:

- Determina-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de um dia (24 horas), considerando os valores dos indicadores integralizados em intervalos de 10 (dez) minutos, ao longo de 7 (sete) dias consecutivos;
- O valor do indicador corresponde ao maior entre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

Os limites globais inferiores correspondentes aos indicadores de tensões harmônicas individuais de ordens 2 a 50, bem como ao indicador DTHTS95% estão apresentados na Tabela 1.2.

TABELA 1.2

Limites globais inferiores de tensão em porcentagem da tensão fundamental

V < 69 KV				V ≥ 69 KV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥ 8	1%			≥ 8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥ 27	1%			≥ 27	0,5%		
THD = 6%				THD = 3%			

Fonte: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional–PRODIST, (2008).

### 1.3.2.3 Recomendação IEEE std. 519-1992

O guia IEEE 519 [2], é uma recomendação internacional que estabelece limites para harmônicas de tensão e corrente. Além de estabelecer limites descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica e indica métodos de medição. O enfoque da recomendação

IEEE 519 é diverso daquele da norma IEC 61000, pois os limites estabelecidos referem-se ao ponto de acoplamento comum e não a equipamentos individuais como a IEC 61000. Sendo assim, para a recomendação IEEE 519 não importam os harmônicos que circulam dentro da instalação elétrica analisada, mas sim o que se reflete para o exterior, afetando os outros consumidores conectados à rede elétrica.

Os limites estabelecidos para harmônicas de corrente estão descritos na Tabela 1.3:

TABELA 1.3  
Limites para harmônicas de corrente.

<b>Máxima corrente harmônica em % da corrente de carga (<math>I_o</math> - valor da componente fundamental)</b>						
$I_{cc}/I_o$	<11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	TDD (%)
< 20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20 < 50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50 < 100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100 < 1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte: IEEE std. 519-1992.

Observando a Tabela 1.3, é possível observar que os limites estabelecidos são em função de uma relação da corrente de curto circuito máxima ( $I_{cc}$ ) em relação à corrente de carga ( $I_o$ ). Quanto maior for a corrente de curto-circuito em relação à corrente de carga, maiores serão as distorções de corrente admissíveis, pois elas distorcerão em menor intensidade a tensão no ponto de acoplamento comum. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

Referente aos harmônicos de tensão, os limites estabelecidos pelo guia são os apresentados na Tabela 1.4:

TABELA 1.4  
Limites para harmônicas de tensão.

	<b>Distorção individual</b>	<b>THD</b>
69 kV e abaixo	3%	5%
69001V até 161kV	1,5%	2,5%
Acima de 161kV	1%	1,5%

Fonte: IEEE std. 519-1992.

### 1.3.3 Equipamentos Geradores de distorções harmônicas

Componentes não lineares estão presentes na grande maioria de equipamentos, como lâmpadas fluorescentes, aparelhos de informática, alguns aparelhos domésticos, equipamentos industriais, entre outros. Como alguns dos principais equipamentos geradores de harmônicos citam-se:

#### 1.3.3.1 Lâmpadas Fluorescentes

Um estudo foi realizado em [8] sobre lâmpadas fluorescentes com reatores eletrônicos, tomando como referência as lâmpadas incandescentes. As lâmpadas fluorescentes além de apresentar uma eficiência luminosa em torno de 75% maior que a das lâmpadas incandescentes, apresentam baixo consumo de energia elétrica. Porém estes tipos de lâmpadas, por necessitarem de um reator eletrônico, introduzem distorções na forma de onda da corrente na rede, e em níveis elevados. A circulação dessa corrente em elementos resistivos originará tensões que, somadas à fundamental provocarão distorções na tensão fornecida. Esta situação caracteriza-se quando há um elevado número de lâmpadas fluorescentes na instalação elétrica analisada.

O estudo teve como ênfase as distorções harmônicas geradas pelas lâmpadas fluorescentes. Para isso foram analisados cinco modelos diferentes de lâmpadas. Entre eles, lâmpadas fluorescentes compactas, fluorescentes tubulares e uma lâmpada incandescente.

Dentre todas as análises realizadas em [8], como já era esperado, a lâmpada incandescente de 60W teve baixo THD e alto fator de potência, porém baixa eficiência. Na análise das lâmpadas fluorescentes, a lâmpada compacta apresentou grande distorção harmônica de corrente e baixo fator de potência. Se tratando da lâmpada fluorescente tradicional, os ensaios foram realizados com reator indutivo e *starter*, e também com reator eletrônico de partida rápida. No modelo com reator indutivo e *starter*, verificou-se que a THD ficou relativamente baixa, comparando com a lâmpada compacta, porém as perdas elevaram-se devido ao reator indutivo (perdas ôhmicas e magnéticas). No outro modelo, com reator eletrônico de partida rápida e alto fator de potência, foi observado que houve uma compensação do fator de potência do conjunto, porém os níveis de harmônicos elevaram-se.

Nas análises realizadas, verificou-se que as lâmpadas fluorescentes causam significativa distorção harmônica de corrente.

### 1.3.3.2 Computadores e outros equipamentos de informática

Em [9] foi realizado um estudo de caso de um edifício comercial onde computadores e equipamentos de escritório são grandes geradores de corrente harmônicas. Estes equipamentos geram principalmente harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem. As medições realizadas em [9] seguiram as orientações da norma IEC 61000-4-7 para medição do valor instantâneo de conteúdo harmônico e fator de potência [4]. As medições foram realizadas durante alguns dias. Os principais componentes analisados foram computadores e impressoras e os índices de distorções harmônicas de corrente ficaram na média de 48%, 38% e 71% nas três fases respectivamente, fase A, fase B e fase C. Os índices de THD foram muito elevados comparados com o valor recomendado pela norma que é de 15% [4]. A corrente de neutro também foi analisada, ficou em 37,9A, com isso se forem instalados mais computadores no prédio, o risco de excesso de corrente de neutro pode ocorrer devido a um aumento da distorção harmônica de corrente. Analisando o estudo desenvolvido em [9], observou-se que computadores e outros equipamentos de informática necessitam de uma atenção especial com respeito às distorções harmônicas, pois seus índices de THD são relativamente altos.

### 1.3.3.3 Equipamentos industriais

No trabalho desenvolvido em [10], foi realizado um estudo de caso de uma planta industrial onde foram medidas tensão e corrente em cinco transformadores, primeiramente o transformador da subestação e mais quatro transformadores de equipamentos industriais. A partir das análises realizadas observa-se que o sistema elétrico analisado opera com os limites de distorção harmônica de tensão atendendo as recomendações do Operador Nacional do Sistema (ONS).

Conforme [10], na entrada da subestação, as distorções harmônicas de tensão variam de 1,3% a 1,91%, sendo que o limite é de 3%, então está dentro das normas. Em relação aos níveis de tensão eficaz, dois dos transformadores analisados ultrapassaram os limites preestabelecidos. Isto acontece por que ambos possuem filtros para minimizar as distorções harmônicas sem chaveamento do banco de capacitores. Portanto a potência reativa aplicada pelos filtros é aplicada quando o equipamento está em operação ou não, então nos momentos em que os equipamentos param de operar, a tensão excede aos limites recomendados pela norma [1]. Os outros pontos analisados não apresentaram qualquer tipo de problema.

Em relação ao fator de potência, observou-se a necessidade de inserir uma compensação reativa para que a empresa possa operar em condições aceitáveis pela ANEEL [1]. Feita a

análise do consumidor industrial [10], observou-se que a empresa estava operando dentro dos limites estabelecidos pela norma [1] no que diz respeito à distorções harmônicas. Assim se comportando de maneira satisfatória para a qualidade de energia elétrica.

#### 1.3.4 Equipamentos e componentes sensíveis aos harmônicos

Existem inúmeros equipamentos sensíveis a harmônicos. Como exemplos destes equipamentos podem-se citar os transformadores, onde há um aumento das perdas. Ondas harmônicas de tensão aumentam as perdas no núcleo do transformador, enquanto harmônicas na corrente elevam as perdas nos enrolamentos. Quanto maior a frequência da corrente injetada no transformador, maiores serão as perdas, e como consequência, maior será o aquecimento dos enrolamentos [11]. Os motores e geradores também são equipamentos sensíveis, as distorções harmônicas de tensão nos terminais das máquinas geram fluxos harmônicos, e com isso induzem correntes harmônicas no rotor. Este efeito gera perda de rendimento, sobreaquecimento, vibração e barulho audível [12]. Os sistemas de comunicação também são muito sensíveis a harmônicos, pois a potência envolvida é na ordem de miliwatts, e como consequências geradas por essas interferências citam-se os ruídos em sistemas telefônicos (bastante comuns), e até perdas de informações em um sistema de transferência de dados quando a interferência é consideravelmente alta.

#### 1.3.5 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou de maneira sintetizada uma revisão relacionada a indicadores de qualidade de energia com ênfase nas distorções harmônicas. Frequências Harmônicas surgem devido à presença de cargas não lineares nas redes de distribuição, e estas provocam perdas em equipamentos, aquecimento, redução de vida útil, entre outros fatores. As distorções harmônicas possuem limites estipulados por normas e recomendações, e estes devem ser seguidos.

Entre as recomendações existentes, cita-se a IEEE 519, que por meio de profissionais da área estabelece limites para injeção de harmônicos na rede. Mas apesar de ser uma referência mundial, estes limites estabelecidos devem ser encarados como recomendação e não como uma norma a ser seguida. Entretanto, se tratando da IEC e do Prodist da ANEEL [1], ambos são normas a serem seguidas, pois a IEC é um organismo de regulamentação internacional e a ANEEL é um organismo de regulamentação nacional que estabelece valores máximos de injeção de harmônicos no sistema elétrico.

## 2 FILTROS PARA COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS

A compensação das distorções harmônicas é uma das partes mais complexas na análise de um sistema elétrico, pois estas são geradas em várias partes de um sistema e com inúmeras frequências. Para atenuação das harmônicas existem vários métodos. Como principais providências a serem tomadas para limitar as harmônicas, citam-se dois métodos: O melhor aterramento do sistema e a correção do fator de potência. As harmônicas se espalham tanto nos condutores fase, como no neutro também, então um aterramento deficiente colabora para a existência destas. O melhor esquema de aterramento quando há presença de harmônicas é o esquema onde o condutor de neutro e o condutor de proteção são completamente separados [6].

A segunda providência básica é realizar a correção do fator de potência da instalação, pois os capacitores têm a capacidade de filtrar harmônicas, pois estas possuem frequências mais elevadas do que a frequência da onda fundamental. Para frequências mais elevadas a impedância capacitiva é menor, então as harmônicas são conduzidas para o terra. Porém, o uso de um banco de capacitores na entrada da rede não é suficiente para eliminar harmônicas geradas internamente. Por isso é indicado instalar um banco de capacitores em cada equipamento gerador de harmônicas [6].

Estas duas providências já costumam trazer bons resultados, porém se não forem suficientes, e as harmônicas ainda ultrapassarem os limites impostos pelas normas, é necessário partir para a instalação de filtros. A seguir estão listados alguns dos filtros mais utilizados para atenuação de harmônicas.



## 2.1 Filtro Passivo

Este tipo de filtro é instalado em paralelo com a fonte geradora de harmônicas. Consiste em um sistema LC conectado em série. Seu funcionamento consiste em sintonizar as várias células LC na frequência em que se quer eliminar, ou seja, as harmônicas de ordem inferior, com isso este circuito absorve as harmônicas e evita que estas circulem na alimentação [4].

Segundo [5], no que se refere ao estudo de uma planta comercial, observou-se que a contribuição harmônica deste tipo de planta é muito elevada, logo a solução foi a alocação de filtros passivos. Estes, para reduzir o conteúdo harmônico a valores recomendados, devem suportar elevados valores de corrente. Para que o filtro fosse eficiente, foi necessário aumentar a potência reativa do mesmo e sobre dimensionar a tensão nominal do capacitor a um valor acima da tensão do sistema, para que o dielétrico suportasse sobretensão e sobrecorrente elevada. Porém, quanto maior a potência fornecida pelo filtro, e maior a classe de isolamento do capacitor, aumenta o custo agregado a ele.

Conclui-se, analisando [5], que com a adição de filtros passivos sintonizados, boa parte da corrente harmônica é desviada para os filtros, portanto a adição de filtros harmônicos propicia uma redução das perdas e redução do aquecimento dos transformadores, ou seja, uma melhora da qualidade de energia elétrica.

## 2.2 Filtro Ativo

Os filtros ativos podem ser instalados em série ou em paralelo com a carga. Sua função é compensar a tensão harmônica ou a corrente harmônica produzida pela carga não linear. As principais aplicações de filtros ativos são nas instalações comerciais com geradores de harmônicos com potência inferior à 200 kVA [6].

Os filtros ativos são mais caros que os filtros passivos e demandam um nível de potência mais elevada, mas sua aplicação é bem satisfatória, pois diferente dos filtros passivos, estes tem a vantagem de atenuação das harmônicas de forma contínua e flexível, ou seja, através de seu sistema de controle, irá atenuar os harmônicos presentes na barra de conexão.

Em um estudo de caso sobre aplicação de filtros realizado em uma planta industrial [10], verificou-se que ambas as opções de filtros possibilitam atender a IEEE Std. 519 [2], do ponto de vista de distorção harmônica total.

### 2.3 Filtro Ativo Paralelo (FAP)

Neste trabalho, o filtro utilizado nas simulações para compensação de harmônicas é o filtro ativo paralelo, pois tem a característica de compensar cargas não lineares do tipo fonte de corrente. Além disso, um filtro ativo possui maior flexibilidade, podendo ser utilizado para compensar componentes harmônicas, desbalanceamento e potência reativa. O filtro passivo, apesar de ser mais robusto, é projetado para uma dada condição de operação bem específica.

Um filtro ativo paralelo é, na realidade, constituído de um inversor de tensão (VSI) com seu controle. A Figura 2.1 apresenta um diagrama de blocos da estrutura de um filtro ativo paralelo:

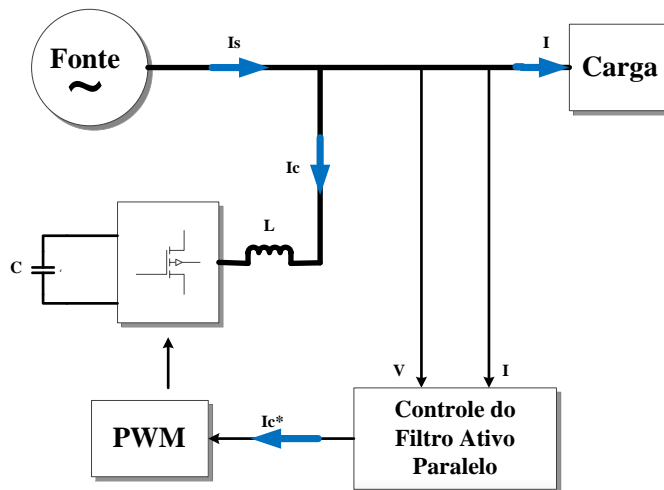


Figura 2.1: Diagrama de blocos do filtro ativo paralelo

O inversor de tensão funciona com malha de controle de corrente e sua função é “curto circuitar” as correntes indesejadas, consumidas pela carga. Estas correntes não desejadas, na maioria dos casos são as componentes harmônicas. Entretanto, em alguns casos, podem ser correntes na frequência fundamental, onde o objetivo é compensar reativos ou desequilíbrios. Portanto, segundo [13], o grande desafio no projeto de um filtro ativo paralelo é a determinação da referência de corrente a ser compensada. Para determinar as correntes de referência, foi utilizada a Teoria da Potência Instantânea, proposta por Hirofumi Akagi [14], que é apresentada a seguir.

### 2.3.1 Teoria p-q

A teoria p-q, conhecida como Teoria da Potência Instantânea foi desenvolvida por Akagi et al (1983) [14] com o objetivo de controlar filtros ativos de potência e é baseada em um conjunto de potências instantâneas que são definidas no domínio do tempo. Segundo [14], esta teoria consiste em uma transformação das coordenadas das correntes e tensões dos eixos abc para  $\alpha\beta 0$ , essa na realidade é uma transformação algébrica de um sistema trifásico para um sistema de referência estacionário, com as coordenadas ortogonais entre si e não  $120^\circ$  como no sistema convencional. Esta transformação é conhecida como Transformação de Clarke. O cálculo das potências é realizado nessas novas coordenadas onde  $p$  é a potência real instantânea,  $q$  é a potência imaginária instantânea e  $p_0$  é a potência de sequência zero.

A transformação direta e inversa das tensões e das correntes é calculada pelas Equações a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A potência real  $p$ , imaginária  $q$  e de sequência zero são dadas pela Equação 2.3:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

A potência ativa trifásica instantânea em termos das variáveis nas coordenadas abc e  $\alpha\beta 0$  é dada por:

$$P_{3\phi} = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c = V_\alpha i_\alpha + V_\beta i_\beta + V_0 i_0 = p + p_0 \quad (2.4)$$

Como podemos observar na equação 2.4, a potência ativa trifásica instantânea é a soma da potência real e da potência de sequência zero, sendo a potência de sequência zero não desejada nas instalações.

Conforme [13], se as variáveis  $\alpha\beta$  da potência imaginária  $q$ , definida em (2.3), forem substituídas pelas suas correspondentes nas coordenadas abc a seguinte equação pode ser escrita:

$$q = -V_\alpha i_\beta + V_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(V_a - V_b) * i_c + (V_b - V_c) * i_a + (V_c - V_a) * i_b] \quad (2.5)$$

Observando a Equação 2.5, nota-se que ela é similar àquela utilizada para medir a potência reativa trifásica ( $Q = 3V_{isen}\phi$ ), entretanto a diferença é que neste caso são utilizados valores eficazes, e no caso da equação 2.5 são utilizados valores instantâneos. No caso da teoria  $p$ - $q$ , o valor da potência instantânea  $q$  corresponde a uma potência que existe nas fases individualmente, mas que no conjunto das fases não contribuem para a potência ativa trifásica.

As correntes e tensões descritas em 2.1 e 2.2 são instantâneas e genéricas e podem conter harmônicos e serem desequilibradas. Assim, segundo [13] no caso mais geral em que estas imperfeições estão presentes, pode-se dizer que as potências instantâneas real, imaginária e de sequência zero terão componentes de valores médios e oscilantes, isto é:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (2.6)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (2.7)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (2.8)$$

Onde a “ $\bar{\quad}$ ” indica valor médio e o “ $\tilde{\quad}$ ” indica parcela oscilante. O fluxo dessas potências está representado na Figura 2.2:

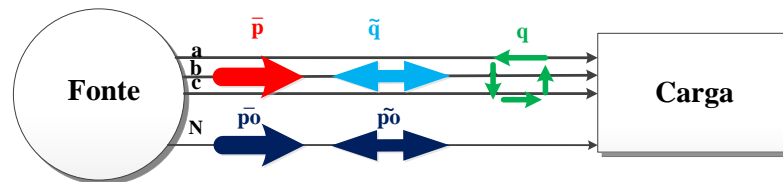


Figura 2.2: Fluxo das potências instantâneas

Para a correta utilização da Teoria de Potência Instantânea é preciso conhecer o significado físico de cada uma das potências envolvidas. A seguir estão listados os conceitos envolvendo as potências em suas partes médias e oscilantes [15]:

$\bar{p}_0$  = valor médio da potência de sequência zero instantânea, correspondente à energia por unidade de tempo que é transferida da fonte de alimentação para a carga através das componentes de sequência zero de tensão e corrente.

$\tilde{p}_0$  = valor oscilante da potência de sequência zero instantânea – representa a energia por unidade de tempo que é trocada entre a fonte de alimentação e a carga através dos componen-

tes de sequência zero. A potência de sequência zero só existe em sistemas trifásicos com neutro onde há desequilíbrio entre as fases.

$\bar{p}$  = valor médio da potência instantânea real: Correspondente à energia ativa que é transferida para a carga.

$\tilde{p}$  = valor oscilante da potência instantânea real: Corresponde à energia que é trocada entre a fonte de alimentação e a carga. Esta potência surge quando há presença de harmônicos no sistema.

$q$  = potência imaginária: Representa a energia que pode ser constante ou não e é trocada entre as fases do sistema. Isto significa que essa potência não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga em nenhum instante.

A Teoria da Potência Instantânea foi utilizada por inúmeros autores, mostrando resultados satisfatórios para compensação de harmônicos, desbalanceamento e potência reativa. Um destes autores, Watanabe [13], faz uma breve comparação entre a Teoria das Potências Instantâneas e a Teoria Convencional, onde ele destaca que o problema fundamental da teoria de potência ativa e reativa convencional vêm do fato de que esta foi desenvolvida inicialmente para circuitos monofásicos e posteriormente foi expandida para circuitos trifásicos como se fossem compostos por três sistemas monofásicos independentes. Além disto, a teoria convencional foi desenvolvida com base em fasores e valores eficazes o que caracteriza ser uma técnica desenvolvida para apenas uma frequência, portanto não é adequado utilizá-la quando mais de uma frequência estão presentes no sistema.

### 2.3.1 Utilização da Teoria p-q para geração das correntes de referência

A Teoria p-q, como descrito anteriormente, é utilizada para o controle do filtro ativo, gerando as correntes de referência com base na medição das correntes consumidas pela carga. O diagrama de blocos da Figura 2.3 descreve simplificada os passos necessários para a geração das correntes de referência:

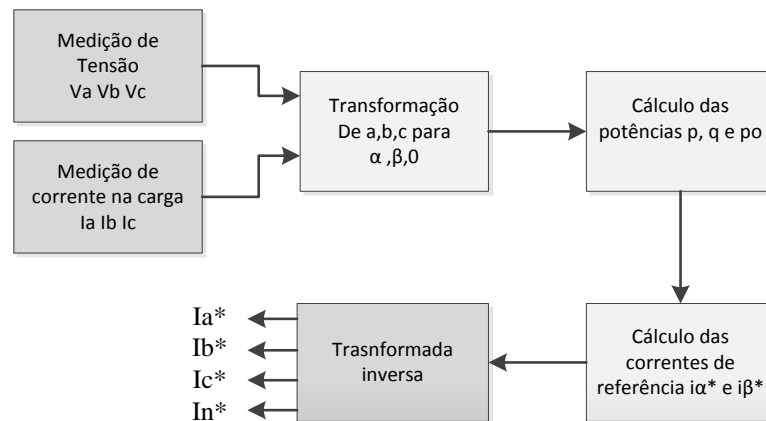


Figura 2.3: Geração das correntes de referência com base na teoria p-q

Primeiramente é realizada a medição das tensões de fase e das correntes nas 3 fases consumidas pela carga. As tensões e correntes são transformadas das coordenadas abc para as coordenadas  $\alpha\beta 0$ . O cálculo das potências, descrito pela equação (2.3), é realizado nas novas coordenadas  $\alpha\beta 0$ . Com base nas potências  $p$ ,  $q$  e  $p_0$ , é realizado o cálculo das correntes de referência, e a partir da transformada inversa de Clarke, obtêm-se as correntes de referência no eixo abc novamente.

As correntes de referência são calculadas conforme Equação 2.9:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha^*} \\ i_{c\beta^*} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Onde no lugar das potências  $p$  e  $q$  são escolhidas as potências que se deseja compensar. Como exemplo, se o objetivo for compensar apenas harmônicos, então se deve utilizar apenas as partes oscilantes das potências real e imaginária, pois são as partes oscilantes que contém os harmônicos, ou seja, frequências diferentes da fundamental. Se o objetivo for compensar harmônicos, potência reativa e desbalanceamento, segundo [15], deve-se utilizar a potência real oscilante, potência média de sequência zero, e potência imaginária como descrito na Equação 2.10:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha^*} \\ i_{c\beta^*} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} - \tilde{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Conforme [14], A corrente de referência  $I_{c0}^*$  é igual a corrente de sequência zero ( $I_0$ ). Após obter as correntes de referência nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  é necessário realizar a transformada inversa para resultar nas correntes de referência nos eixos abc. Esta transformada é descrita pela Equação 2.11:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} * \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_{c0}^* \\ i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A corrente de referência do neutro é descrita pela Equação 2.12:

$$i_{neutro}^* = -(i_{ca}^* + i_{cb}^* + i_{cc}^*) \quad (2.12)$$

A Figura 2.4 ilustra a ideia básica da compensação de corrente utilizando o filtro ativo paralelo. Na figura é demonstrada a fonte trifásica de tensão alimentando a carga não linear que está sendo compensada pelo filtro.

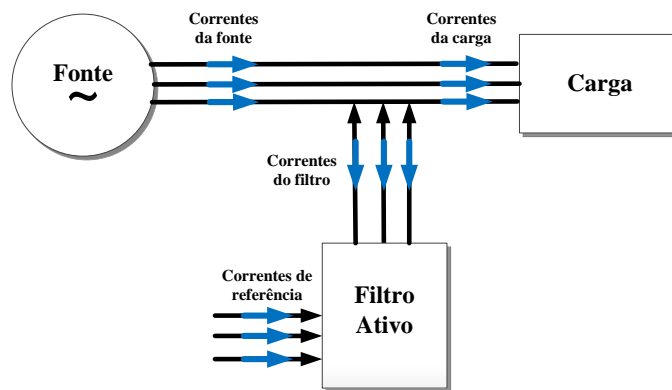


Figura 2.4: Esquema simplificado do filtro ativo paralelo conectado à rede

A Figura 2.5 descreve o fluxo das potências com o filtro em funcionamento. A fonte trifásica deve somente fornecer a potência real média ( $\bar{p}$ ) e a potência de sequência zero média equilibrada ( $\bar{p}_0$ ) que a carga está consumindo. O filtro é capaz de compensar a potência real oscilante ( $\tilde{p}$ ) e a potência imaginária ( $q$ ), além da potência de sequência zero.

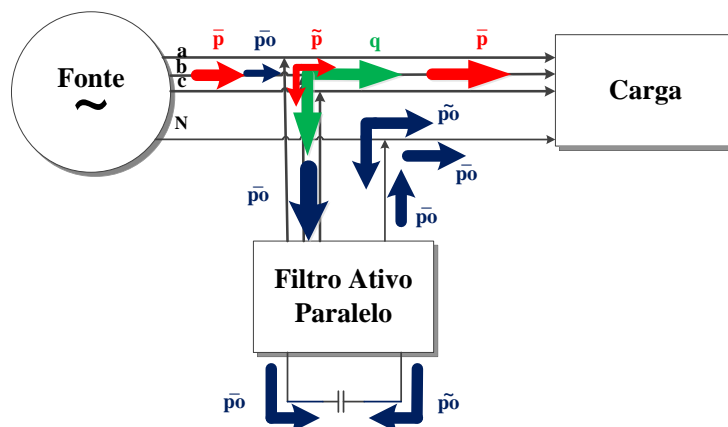


Figura 2.5: Fluxo das potências instantâneas com o filtro em funcionamento

## 2.4 Conclusões Parciais

Este capítulo apresentou métodos de compensação de harmônicos com ênfase no filtro ativo paralelo, o qual será utilizado no projeto desenvolvido no cap. 4. O filtro ativo paralelo é uma ótima opção para mitigação de harmônicas quando a carga tem um perfil que possui uma variação durante o dia, pois ao contrário de um filtro passivo, o filtro ativo tem um sistema de controle que por meio de leitura das tensões e correntes instantâneas, realiza corretamente a geração das referências.

Outro assunto abordado neste capítulo foi a Teoria das Potências Instantâneas, que é utilizada para controle do filtro ativo. Esta teoria foi utilizada por inúmeros autores, mostrando resultados satisfatórios para compensação de harmônicos, desbalanceamento e potência reativa. O principal objetivo desta teoria é a geração das correntes de referência com base em medições de tensão e corrente na carga.



### 3 ANÁLISE DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA - ESTUDO DE CASO EM UM AMBIENTE UNIVERSITÁRIO

A planta em análise é o prédio Acadêmico da Universidade Federal do Pampa, localizada na cidade de Alegrete, no estado do Rio Grande do Sul. O período de monitoramento começou no dia 7 de outubro de 2010 e foi até o dia 20 de janeiro de 2011. Neste capítulo são apresentadas as análises realizadas sobre os dados fornecidos pelo medidor de qualidade de energia utilizado. Primeiramente é analisada a tensão, corrente e potência para todo o período de monitoramento, observando os principais indicadores de qualidade de energia e comparando os valores com as normas pertinentes. Posteriormente são analisadas as distorções harmônicas de tensão e corrente, verificando se os valores totais e individuais estão dentro das normas.

Os dados são apresentados com seus valores máximos, médios e mínimos, onde:

- *Valor máximo*: associado ao maior registro encontrado durante o período de monitoração;
- *Valor mínimo*: associado ao menor registro encontrado durante o período de monitoração;
- *Valor médio P95%*: associado ao valor médio encontrado durante o período em 95% do tempo monitorado, conforme [1].

As medições foram realizadas no secundário do transformador da subestação da planta, este com potência de 112,5 kVA, 13800/380 V.

#### 3.1 Medição

O medidor de qualidade de energia elétrica utilizado foi o *Fluke 1750*, Figura 3.1. Este medidor armazena dados de tensão e corrente com uma taxa de amostragem de 256 amostras/ciclo e é capaz de registrar tensão e corrente em regime permanente, perfis do comportamento

das distorções harmônicas de tensão e corrente, além dos principais indicadores de qualidade de energia. As principais especificações do medidor são [16]:

- Todas as medições estão em conformidade com as normas IEC61000-4-30 para a correta avaliação de todos os valores medidos, incluindo tensão, corrente, alimentação, harmônicos, oscilação etc;
- Capacidade interna de memória de dados de 2Gb;
- Período de gravação máximo de pelo menos 31 dias;
- Gama de medições de tensão: Tensão AC: 1000 V rms  $\pm$  10% acima da gama;
- Valor rms calculado continuamente: em cada ciclo, a cada 1/2 ciclo, e a cada 10 ou 12 ciclos a 50 ou 60 Hz respectivamente, conforme estipulado pela norma IEC 61000-4-30.
- Tem a capacidade de avaliar as perturbações na rede elétrica (conteúdo harmônico de tensão e corrente, variações momentâneas de tensão, “sag”, “swell”, etc); e disponibiliza gráficos com as variações das grandezas medidas ao longo do tempo.



Fonte: WWW.Fluke.com.br

Figura 3.1: Analisador de Qualidade de Energia Fluke 1750

O software para leitura dos dados registrados pelo medidor é o *Fluke Power Analyzer*, onde é possível gerar relatórios, exportar dados para o *microsoft excel*, acompanhar as formas de onda em tempo real, e observar todo período monitorado através de períodos de 10 minutos.

### 3.2 Análise das Tensões

A Figura 3.2 representa o comportamento da tensão de linha no secundário do transformador, onde é possível perceber que os valores de tensão mantiveram-se dentro da faixa dos 361,39 e 402,84 Volts, A resolução 505 da ANEEL, de 26 de novembro de 2001, estabelece os limites mínimo e máximo da tensão fornecida aos consumidores. A resolução considera que a tensão adequada está na faixa de 348 V a 396 V e a tensão precária está na faixa de 346 V à 403 V . Considerando os valores máximos de tensão demonstrados na tabela 3.1, observa-se que todos estão na faixa considerada precária, pois todas as fases excederam 396 V. Sobre os valores mínimos, estes ficaram na faixa considerada adequada pela ANEEL, compreendidos entre 361,39 e 363,72 V. A média das tensões de linha ficou na faixa adequada, permanecendo entre os valores de 389,03 V e 392,48 V, conforme tabela 3.1.

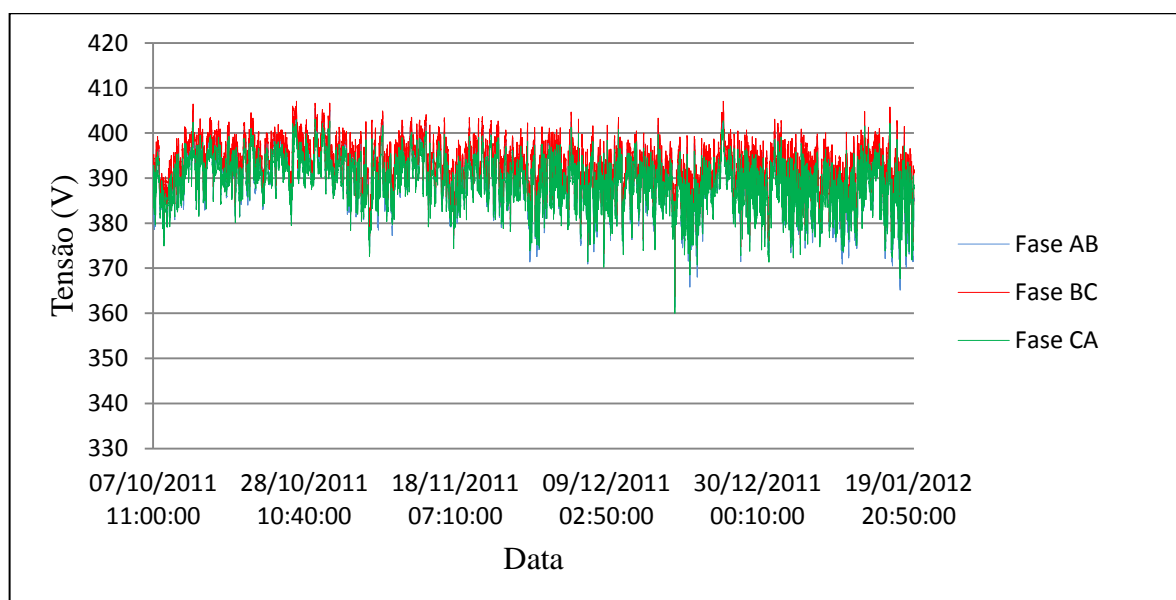


Figura 3.2: Comportamento da tensão de linha

TABELA 3.1

Valores máximos, mínimos e médios da tensão de linha

	AB	BC	CA
Valor Máximo	401,45V	402,84V	399,20V
Valor Médio	390,12V	392,48V	389,03V
Valor Mínimo	361,39V	363,72V	360,04V

### 3.2.1 Afundamentos e Elevações de Tensão

Em todo período de análise, ocorreram inúmeros eventos de afundamentos de tensão, sendo a maioria afundamentos momentâneos de tensão com duração máxima da ordem de milissegundos. A figura 3.3 apresenta um evento registrado pelo medidor de afundamento de tensão com duração de aproximadamente 60 ms. Se referindo a elevações de tensão, no período de monitoramento não foi registrado nenhum evento deste tipo.

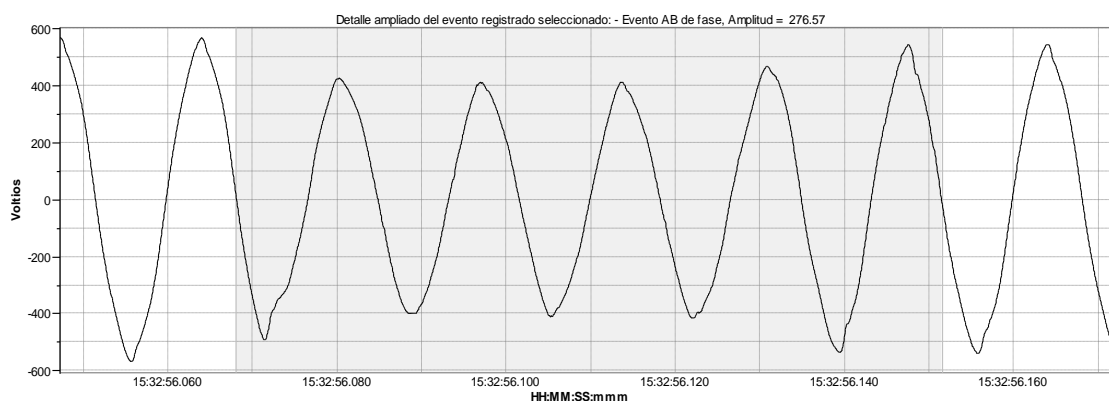


Figura 3.3: Afundamento de tensão ocorrido durante as medições.

### 3.2.2 Interrupções de tensão

Durante todo período analisado houve apenas uma interrupção considerada de curta duração, com duração de 1min e 5,38s. Referente às interrupções de tensão de longa duração houveram quatro eventos com duração máxima de 1h e 55min no mês de janeiro, evento que é possível observar na Figura 3.4:

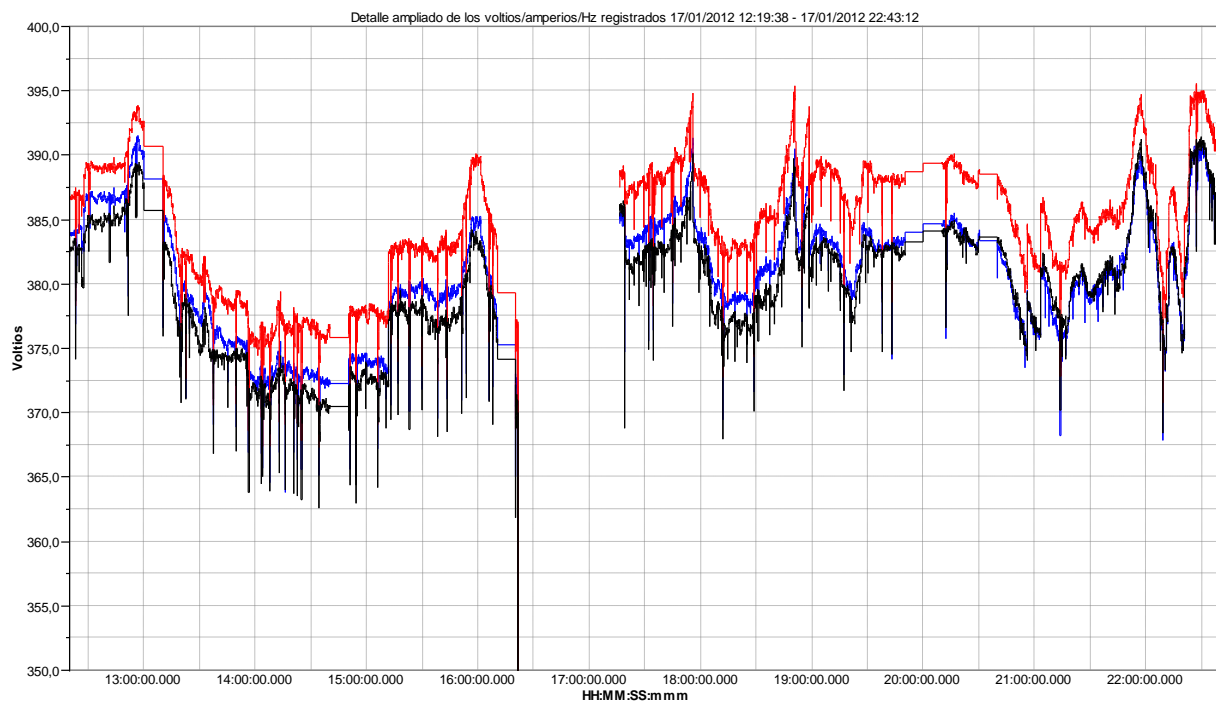


Figura 3.4: Interrupção de Tensão

### 3.2.3 Desequilíbrio de Tensão

O medidor de qualidade de energia é capaz de fornecer os valores de desequilíbrio de tensão que estão apresentados na Tabela 3.2:

TABELA 3.2

Valores máximos e mínimos do desequilíbrio de tensão

	Outubro	Novembro	Dezembro	Janeiro
Valor máximo	0,67	0,71	0,81	0,89
Valor mínimo	0,21	0,23	0,26	0,30

O limite estabelecido pela ANEEL [1], referente ao desequilíbrio de tensão, é de  $K=1,5$ . Portanto, conforme descrito na tabela 3.2, durante todo o período de monitoramento os valores não ultrapassaram o limite.

### 3.3 Variações de frequência

A frequência se manteve constante em todo período de monitoramento. Os limites de variações estipulados pela norma [4] são de 1 Hz para mais ou para menos, ou seja, 59 Hz até 61 Hz. A Figura 3.5 demonstra a variação de frequência, onde observa-se que a frequência teve sua variação entre 59,91Hz a 60,11Hz, assim permanecendo dentro dos limites aceitáveis.

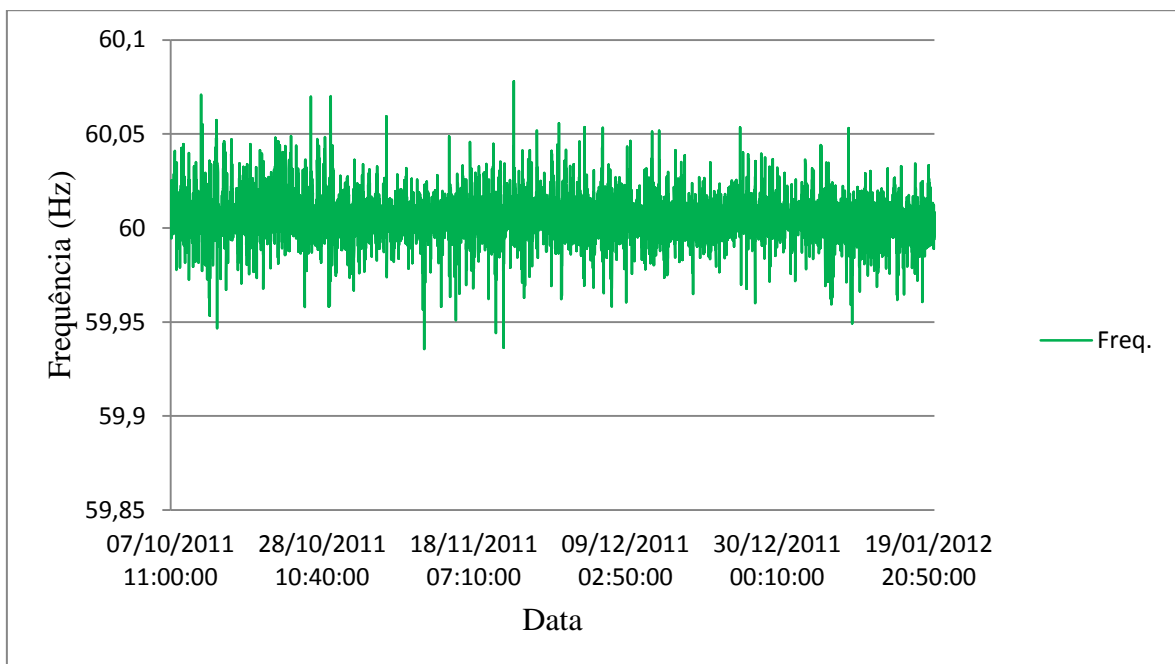


Figura 3.5: Variação de Frequência durante todo período de análise

### 3.4 Análise das correntes

A Figura 3.6 apresenta o perfil das correntes RMS em todo período de monitoramento. Nota-se no gráfico que a corrente na fase A é relativamente mais elevada que as outras, o que implica que a fase A está com um carregamento excessivo em relação à fase B e C. É possível ainda notar que no período do verão há mais consumo devido à grande utilização dos aparelhos de ar condicionado.

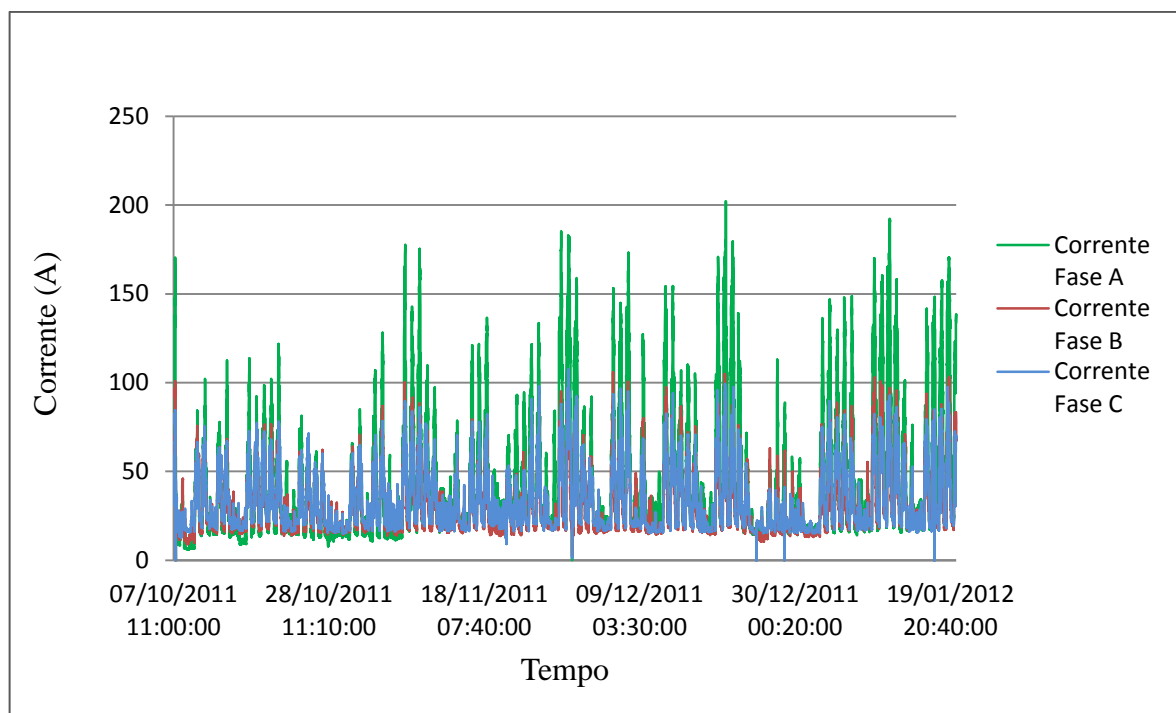


Figura 3.6: Perfil das correntes durante todo período de estudo

A Tabela 3.3 apresenta os valores das correntes nas três fases e no neutro. Nesta tabela é possível observar a elevada corrente de neutro, que ocorre devido ao desbalanceamento entre as fases, ou seja, o condutor neutro transporta a corrente desequilibrada das fases. Em um sistema equilibrado o somatório das correntes nas três fases é igual a zero, porém no caso da planta em análise, a carga é desequilibrada, com isso o somatório das correntes corresponde a um determinado valor, conforme Equação (3.1):

$$i_{neutro} = i_{fase a} + i_{fase b} + i_{fase c} \quad (3.1)$$

É possível notar o desbalanceamento nos valores das correntes máximas, onde a fase A está consumindo aproximadamente o dobro da fase B e da fase C, observando a Tabela 3.3.

TABELA 3.3

Valores máximos, médios e mínimos das correntes nas três fases e neutro

	Fase A	Fase B	Fase C	Neutro
Valor Máximo	202,2A	105,9A	107,38A	103,64A
Valor Médio	43,40A	31,12A	33,07A	27,94A
Valor Mínimo	0,18A	2,41A	1,20A	12,08A

### 3.5 Análise das Potências

O registrador de qualidade de energia fornece todos os dados referentes à energia consumida na instalação elétrica. As Figuras 3.7, 3.8 e 3.9 representam as potências ativa, aparente e reativa, respectivamente.

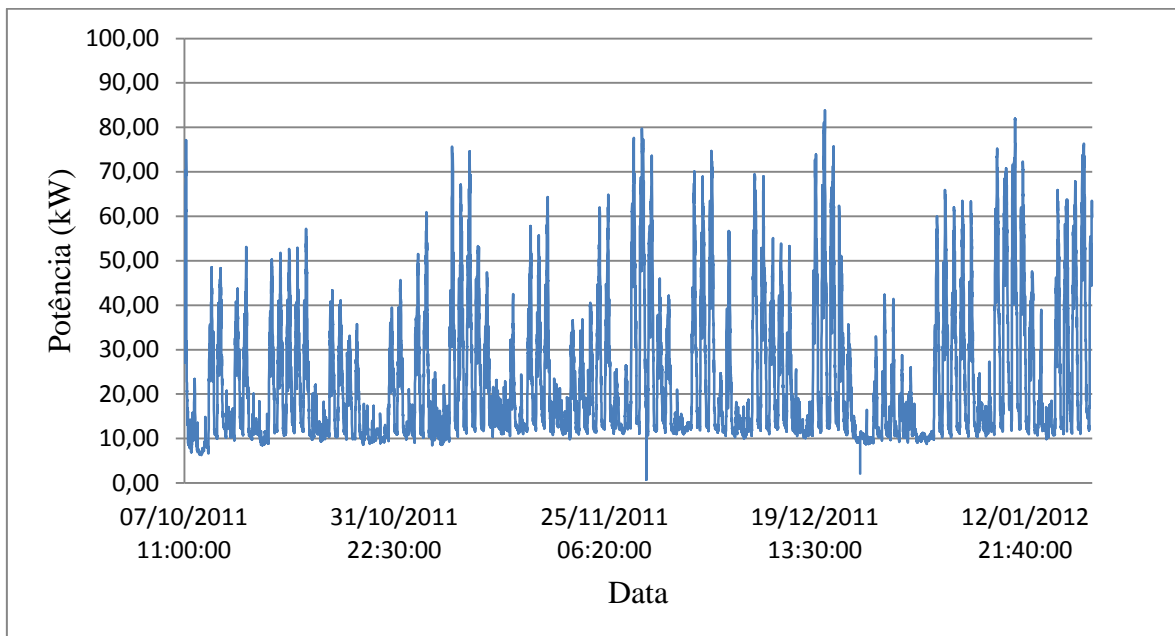


Figura 3.7: Potência ativa consumida durante o monitoramento.

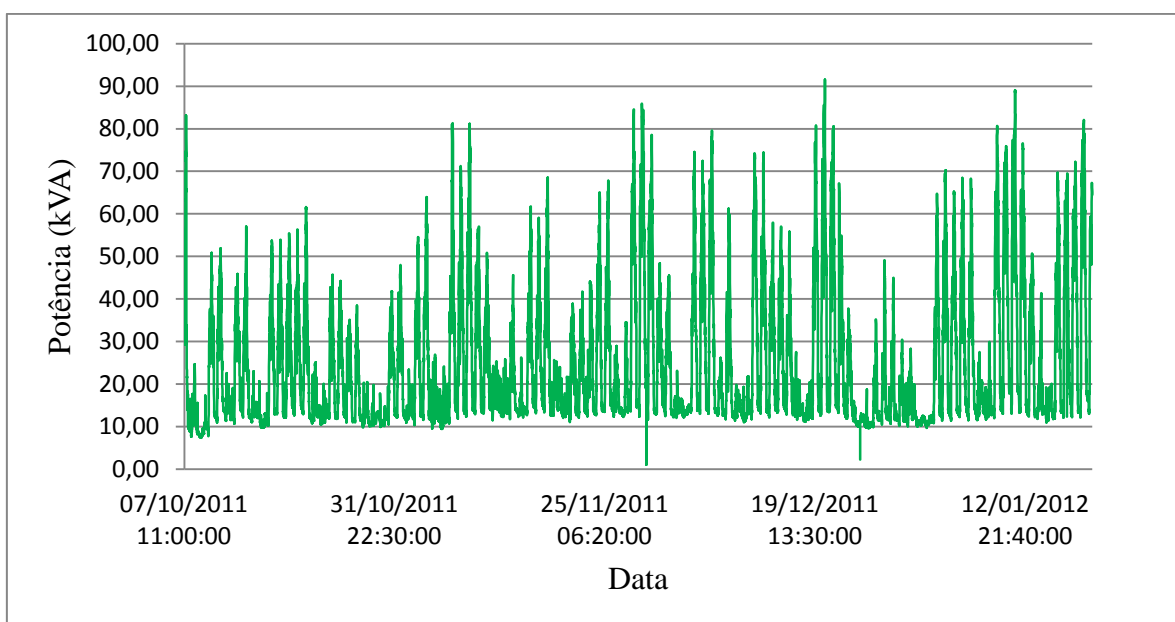


Figura 3.8: Potência Aparente consumida durante o monitoramento.



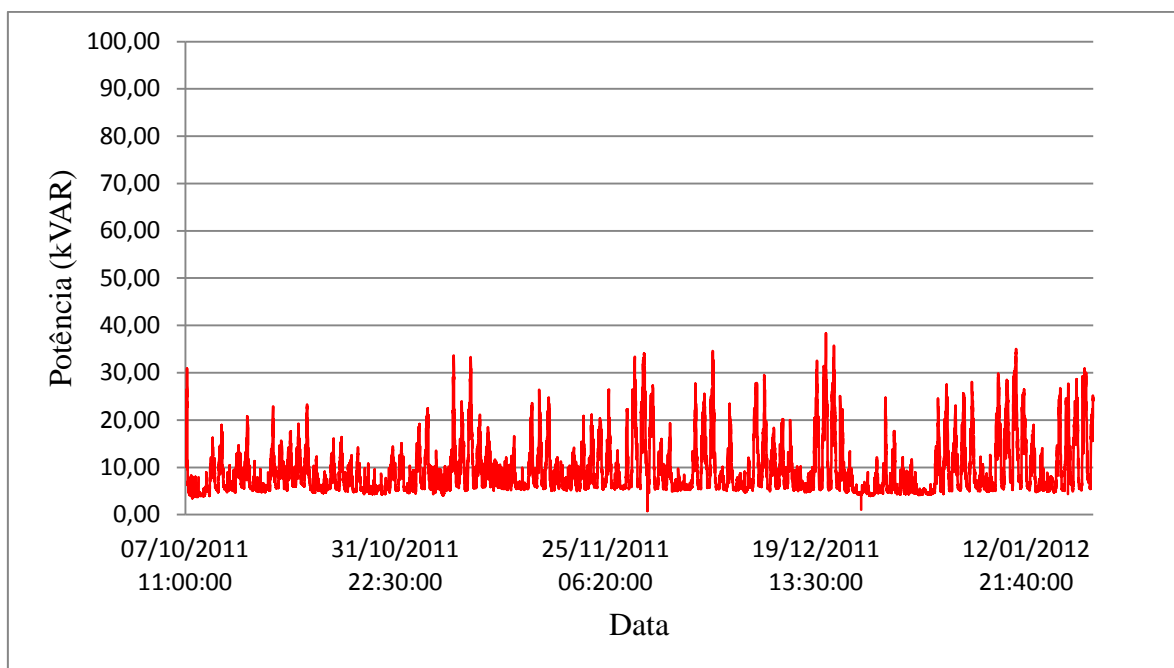


Figura 3.9: Potência Reativa consumida durante o monitoramento.

Analisando os gráficos das potências, é possível notar que a potência aparente em nenhum momento ultrapassou os 100 kVA, permanecendo na média de 24,78 kVA, sendo que a subestação foi projetada para fornecer 112,5 kVA. A Tabela 3.4 apresenta os valores máximos e médios das potências totais:

TABELA 3.4  
Potência Total Consumida

	Valor Mínimo	Valor Médio	Valor Máximo
Potência Ativa (W)	0,70 kW	22,91 kW	83,83 kW
Potência Aparente (VA)	1,06 kVA	24,78 kVA	91,57 kVA
Potência Reativa (Var)	0,79 kVar	9,32 kVar	38,30 kVar

### 3.5.1 Fator de Potência

O fator de potência indica qual porcentagem da potência total fornecida é efetivamente utilizada como potência ativa, potência que gera trabalho. Portanto o fator de potência mostra o grau de eficiência do uso dos sistemas elétricos. O fator de potência foi medido durante todo período de monitoramento. Seu valor médio ficou em 0,9166, abaixo do valor estabelecido pela norma, que é 0,92. O valor máximo chegou a 0,97 e o valor mínimo ficou em 0,47.

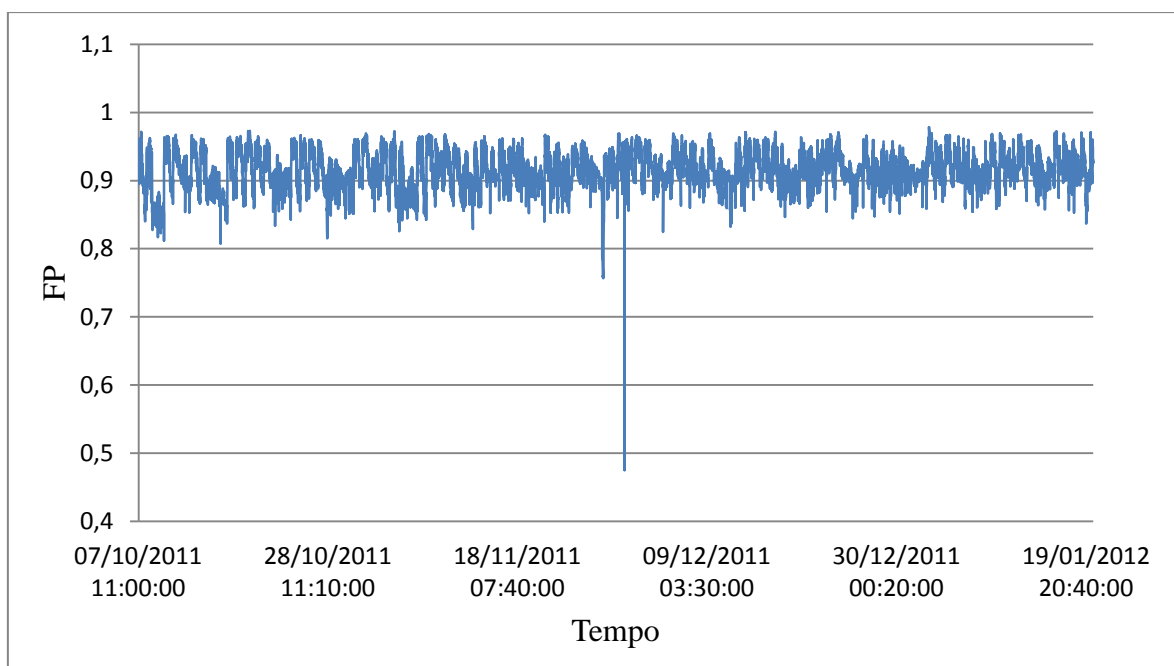


Figura 3.10: Fator de potência

### 3.6 Distorções harmônicas

Após ter sido realizado um breve estudo sobre os principais indicadores de qualidade de energia elétrica, neste item é desenvolvida a análise das distorções harmônicas de tensão e de corrente com base nos dados coletados.

#### 3.6.1 Distorção harmônica de tensão

Com relação aos harmônicos de tensão, considerando os valores P95%, a distorção Total de tensão (THD) chegou ao valor máximo de 4,46%, permanecendo dentro do limite estipulado pela norma [1], que é de 6%, entretanto o valor médio da THD para as três fases foi de 2,29%, bem abaixo do limite. Referente aos harmônicos individuais de tensão, as componentes de maior amplitude foram a 5ª e a 7ª harmônicas, como demonstrado na Tabela 3.5, onde os valores extremos foram de 2,54% para a 5ª harmônica e 0,78 % para a 7ª harmônica, portanto estão dentro dos limites, conforme apresentado na tabela 1.4 os valores estipulados pela recomendação IEEE 519[2].

TABELA 3.5  
Distorção Harmônica Total de tensão (THD<sub>v</sub>)

Período	AB		BC		CA	
	P95%(%)	Máx.(%)	P95%(%)	Máx.(%)	P95%(%)	Máx.(%)
THD <sub>v</sub> - outubro	2,95	3,31	3,21	3,38	2,98	3,37
THD <sub>v</sub> - novembro	3,46	4,21	3,87	4,46	3,56	4,29
THD <sub>v</sub> - dezembro	2,93	3,37	3,34	3,77	2,97	3,47
THD <sub>v</sub> - janeiro	2,61	3,23	2,88	3,60	2,66	3,17

A Figura 3.11, representa as formas de onda das tensões de linha no momento onde ocorreu o maior valor de THD<sub>v</sub>, que foi no dia 6/11/2010 às 11:40h. Como podemos notar a forma de onda está levemente distorcida devido ao pico na forma de onda da corrente que ocorre em consequência da grande presença de cargas não lineares. Com isso a forma de onda sofre um leve achatamento no seu valor máximo.

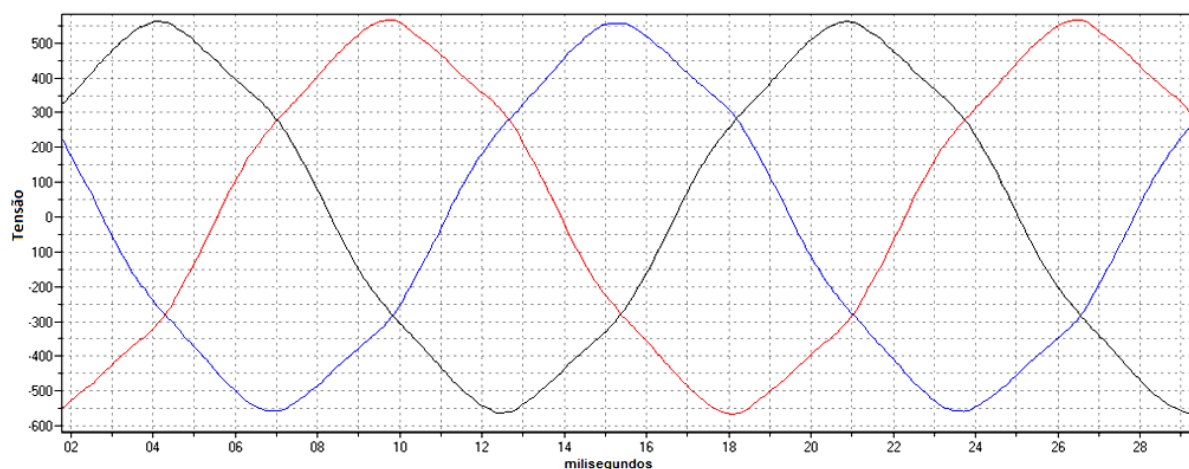


Figura 3.11: Formas de onda das tensões de linha no momento de maior THD<sub>v</sub>

A tabela 3.6 representa os harmônicos individuais de cada fase, bem como o limite estipulado pela ANEEL [1]. Analisando a tabela nota-se que em nenhum momento os harmônicos individuais ultrapassaram os limites.

TABELA 3.6  
 Distorção harmônica individual de tensão (% da fundamental)

Nº	AB	BC	CA	Limites (%)
1	100,00	100,00	100,00	-
3	0,21	0,33	0,26	5
5	2,26	2,54	2,32	5
7	0,55	0,78	0,60	5
9	0,15	0,08	0,11	3
11	0,22	0,38	0,38	3
13	0,17	0,26	0,16	3
15	0,11	0,07	0,08	2
17	0,10	0,11	0,10	2
19	0,10	0,13	0,13	2
21	0,09	0,07	0,10	2
23	0,09	0,09	0,05	2
25	0,07	0,06	0,04	2

A Figura 3.12 apresenta os harmônicos individuais em forma de espectro, onde é possível notar a presença da componente fundamental, e a presença da 5ª e da 7ª harmônica. As demais harmônicas são praticamente insignificantes devido ao seu baixo valor.

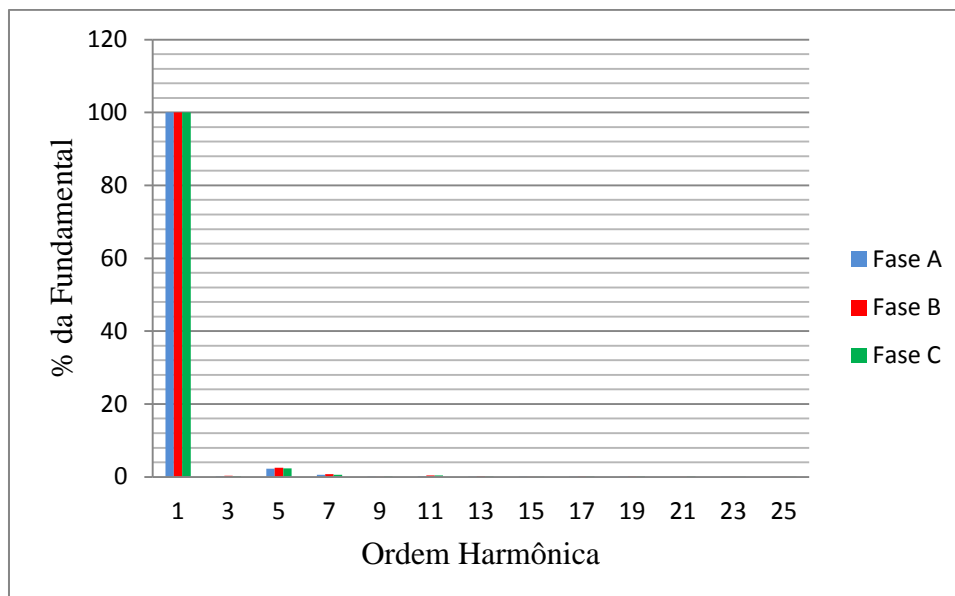


Figura 3.12: Espectro das distorções harmônicas de tensão

Com base na avaliação realizada, em relação às harmônicas de tensão, as instalações da Unipampa Alegrete-Rs não estão infringindo as normas e recomendações, portanto os níveis de harmônicas de tensão estão dentro dos limites aceitáveis.

### 3.6.2 Distorção harmônica de corrente

Em relação às distorções harmônicas de corrente, devido ao grande número de cargas não lineares presentes na instalação, percebeu-se que os índices foram bem elevados conforme Tabela 3.7. A Tabela 3.7 demonstra os valores de distorção de corrente individuais e a Tabela 3.8 apresenta os dados de distorção harmônica total de corrente THDi.

Referente aos harmônicos individuais de corrente foi utilizada a recomendação da IEEE 519 [2] para quantificação, pois as demais normas e recomendações não estipulam limites de distorção para uma instalação, e sim limites para equipamentos individuais, divididos em classes como descrito em [4]. Segundo a recomendação IEEE 519 [2], para análise das distorções individuais de corrente, deve-se considerar a relação  $I_{cc}/I_{nominal}$ , ou seja, a relação da corrente de curto circuito trifásico pela corrente nominal da instalação, conforme Tabela 1.3 do capítulo anterior. Então, a corrente nominal no lado de alta consumida pela instalação é calculada da seguinte forma:

$$I_{nominal AT} = \frac{112,5KVA}{\sqrt{3}.13800} = 4,70 A \quad (3.1)$$

Para o cálculo do curto circuito trifásico, foi necessário consultar a empresa de energia elétrica que atua na região, para obter os dados referentes ao circuito que alimenta o prédio em análise. Os dados são os seguintes:

Circuito: ALE-8008 (AL-04)

- $S_{base} = 100 \text{ MVA}$
- $V_{base} = 13,8 \text{ KV}$
- $Z_{(+/-)} = (0,4845 + j1,6210) pu$

Com os dados disponíveis, foram realizados uma série de passos para chegar ao valor de curto circuito trifásico. Primeiramente foi calculada a corrente na linha dada pela Equação 3.2:

$$I_l = 112500 \cdot \frac{380}{13800} = 3097,82 A \quad (3.2)$$

A potência base é dada pela Equação 3.3, então a corrente base é calculada por (3.4):

$$S_{base} = 100 \text{ MVA} \quad (3.3)$$

$$I_{base} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 13800} = 4183,69 \text{ A} \quad (3.4)$$

$$I_{lpu} = \frac{I_l}{I_{base}} = 0,74 \text{ pu} \quad (3.5)$$

A corrente de curto circuito trifásico em *pu* é descrita na Equação 3.6, e posteriormente é multiplicada pelo valor da corrente base (Equação 3.4), resultando no curto circuito trifásico, Equação 3.8:

$$I_{cc3\phi(pu)} = \frac{1 \angle 90}{(0,4845 + j1,6210)} = 0,59106 \quad (3.6)$$

$$I_{cc3\phi} = I_{cc3\phi(pu)} \cdot I_{base} \quad (3.7)$$

$$I_{cc3\phi} = 2472,84 \text{ A} \quad (3.8)$$

A relação  $I_{cc}/I_{nominal}$  é descrita na Equação 3.9:

$$\frac{I_{cc}}{I_{nominal}} = \frac{2472,84}{4,70} = 526,13 \quad (3.9)$$

Portanto, conforme tabela 1.3, os valores de limite referentes ao valor encontrado na Equação 3.9, estão descritos na tabela 3.7 e pode-se observar que alguns valores ultrapassaram o limite estipulado, confirmando que a instalação tem inúmeros equipamentos produtores de distorções harmônicas de corrente.

TABELA 3.7  
Distorção harmônica individual de corrente

Nº	A	B	C	Limite (%) IEEE 519
1	100,00	100,00	100,00	
3	10,25	22,85	17,83	12
5	3,35	14,11	9,95	12
7	2,15	7,18	5,24	12
9	0,91	4,10	2,76	12
11	0,62	2,95	2,60	5,5
13	0,42	1,99	1,47	5,5
15	0,22	1,38	1,10	5,5
17	0,37	0,91	0,70	5
19	0,43	0,74	0,81	5
21	0,18	0,87	0,83	5
23	0,18	0,70	0,30	2
25	0,16	0,47	0,36	2

A Tabela 3.8 apresenta os valores de distorção harmônica total de corrente. Analisando os dados, observa-se que a *THDi* atingiu valores bem elevados, porém não há nenhuma norma ou recomendação que quantifique a distorção harmônica total de corrente. Somente a distorção total de demanda é quantificada pela recomendação IEEE 519. Este indicador difere da distorção harmônica total pelo fato de que a *THDi* compara os valores das medições com a corrente fundamental, e a *TDD* compara os valores com a máxima corrente de carga. A Tabela 3.9 abaixo demonstra os valores de Distorção total de demanda para todo o período de monitoração.

TABELA 3.8  
Distorção Harmônica Total de corrente (THDi)

Fase	A		B		C	
	Média(%)	Máx.(%)	Média(%)	Máx.(%)	Média(%)	Máx.(%)
THDi - outubro	19,72	45,56	36,92	51,70	29,11	39,93
THDi - novembro	15,07	31,26	38,63	58,48	27,27	45,87
THDi - dezembro	13,82	21,70	36,05	59,97	25,96	42,75
THDi - janeiro	12,27	24,18	36,78	59,02	25,09	43,17

TABELA 3.9  
Distorção Harmônica Total de demanda (TDD)

	TDD (%)	Limite IEEE 519. (%)
Fase A	6,51	15
Fase B	16,71	15
Fase C	12,67	15

Analisando os dados da Tabela 3.9, é possível notar que a fase B ultrapassou o limite estabelecido pela IEEE 519 [2], portanto é necessário encontrar uma solução para este problema.

A Figura 3.13 apresenta o espectro de corrente em função da corrente fundamental. Nota-se a significativa presença da 3ª e da 5ª harmônica. A fase B tem os maiores valores de harmônicas individuais, confirmando o fato de que é a fase que tem o maior número de cargas não lineares conectadas.

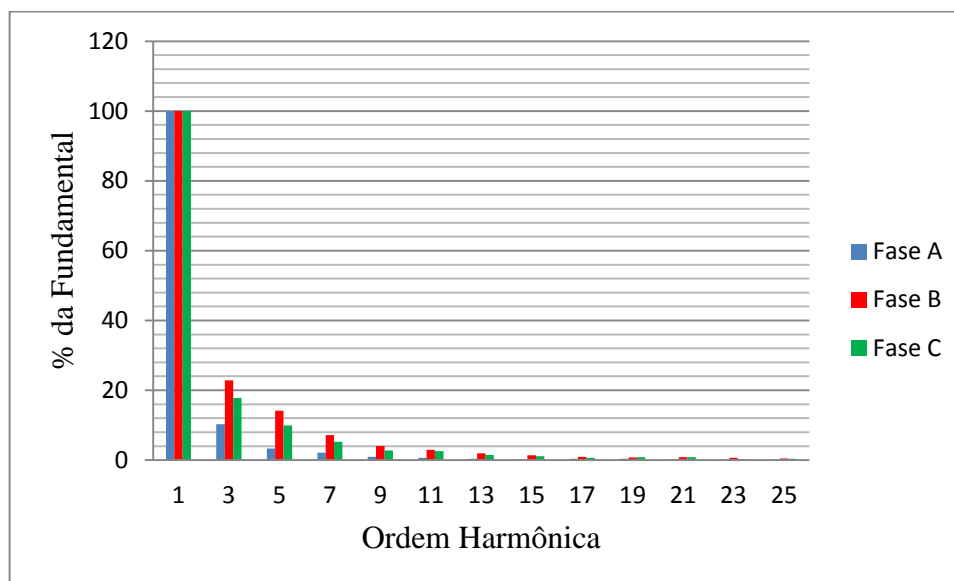


Figura 3.13: Espectro da distorção harmônica individual de corrente

O maior valor de  $THDi$  ocorreu em 24/12, sendo este apresentado na Figura 3.14, referente ao gráfico fornecido pelo medidor.



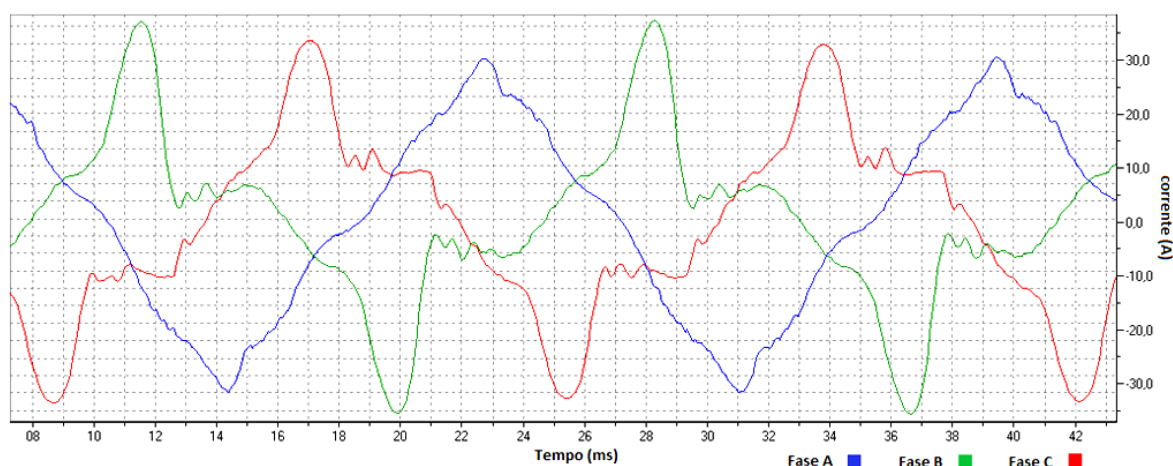


Figura 3.14: Momento mais crítico da THDi

Nota-se no gráfico o efeito dos diferentes pontos de comutação dos diodos que torna a forma de onda mais próxima de uma triangular. A suavização da forma de onda é atribuída à carga do tipo indutor saturado, onde há uma característica senoidal até a saturação do indutor [17].

### 3.7 Conclusões Parciais

Analisando os dados de tensão, foi possível observar que se tratando de valores máximos registrados, a concessionária de energia deveria ter uma atenção especial, pois os valores registrados estão na faixa considerada precária. Referente aos valores de corrente registrados foi possível observar um sobrecarregamento da fase A em relação às fases B e C, ou seja, a carga é desequilibrada, fazendo assim surgir uma elevada corrente de neutro.

O fator de potência médio da instalação, como foi possível observar na Figura 3.10, ficou abaixo do valor estabelecido pela norma, portanto é preciso ter uma atenção especial à potência reativa consumida pelo sistema, que está em um nível não aceitável.

Com base na avaliação realizada, referente aos níveis de harmônicas de tensão, a instalação elétrica em análise está dentro dos limites estabelecidos pelas normas e recomendações. Entretanto, referente aos harmônicos de corrente, alguns valores de distorção individual de corrente e de distorção total de demanda ultrapassaram os limites impostos pela recomendação internacional IEEE 519 1992 [2]. Embora a norma brasileira [1] quantifique apenas os harmônicos de tensão, é preciso ter uma atenção especial com relação aos harmônicos de corrente, pois quando estes atingem limites elevados causam distorções não aceitáveis na forma

de onda da tensão. Portanto o objetivo do próximo capítulo é encontrar meios de atenuar estas distorções de corrente, para que permaneçam dentro dos limites aceitáveis.

## 4 MODELAGEM DO SISTEMA E RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Após ter sido realizado o estudo sobre a qualidade de energia elétrica da planta universitária, observou-se que os níveis de harmônicos de corrente ultrapassaram os limites, portanto, neste capítulo é realizada a modelagem da carga a fim de obter uma aproximação do sistema elétrico. A modelagem do sistema elétrico foi realizada no *software PSim* versão 9.0.3. Posteriormente é apresentado o projeto do filtro ativo paralelo e por fim os resultados obtidos das simulações.

### 4.1 Modelagem do sistema

A modelagem da carga foi realizada com base nos dados reais das medições realizadas e utilizando também dados do transformador, para realizar a modelagem da impedância da linha.

#### 4.1.1 Modelagem da linha

A impedância da linha, por ter um valor muito baixo, é modelada considerando a impedância do transformador. O transformador instalado na subestação é um transformador trifásico de 112,5 KVA, 13800/380 V, e conforme [18] possui uma impedância aproximada de 3%. Tendo o conhecimento da impedância do transformador, o próximo passo é encontrar o valor base da impedância, sendo que esta está em pu, como segue na Equação 4.1:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (4.1)$$

Onde  $V_{base}$  corresponde a 380 V e a potência base ( $S_{base}$ ) é o valor da potência do transformador, 112,5 KVA. Portanto a impedância base é calculada conforme (4.2):

$$Z_{base} = \frac{380^2}{112500} = 1,283 \Omega \quad (4.2)$$

Com o valor calculado em (4.2), a impedância do transformador é:

$$Z_{3\%} = 0,038 \Omega \quad (4.3)$$

Para o cálculo da resistência e reatância, é necessário o conhecimento do ângulo da impedância calculada acima. Para cálculo deste ângulo, foi utilizada uma tabela que contém os valores típicos de impedância, resistência e reatância para cada transformador, conforme foi utilizado em [18]. Com base nos valores apresentados para o transformador de 112,5 kVA, é possível calcular o ângulo da impedância do transformador, Equação 4.4:

$$\phi = \arctg\left(\frac{X_{dispersão}}{R}\right) = 76,8^\circ \quad (4.4)$$

Onde  $X_{dispersão}$  e  $R$  são fornecidos na tabela de valores típicos disponível em [18].

Com os valores referentes à impedância e seu ângulo, é possível calcular a resistência e a reatância do transformador da subestação, como segue nas equações 4.5 e 4.6:

$$R = Z * \cos\phi = 0,038 * 0,227 = 0,0088 \Omega \quad (4.5)$$

$$X = Z * \sen\phi = 0,038 * 0,973 = 0,0375 \Omega \quad (4.6)$$

Com o valor da impedância completa, é possível determinar a resistência e calcular a indutância, conforme Equação 4.7:

$$R = 0,0088 \Omega \quad (4.7)$$

$$X = 2. \pi. 60. L \quad (4.8)$$

$$L = \frac{X}{2. \pi. 60} = \frac{0,0375}{2. \pi. 60} = 99,478 \mu H \quad (4.9)$$

#### 4.1.2 Modelagem da carga

Com a impedância da linha modelada, o próximo passo foi realizar a modelagem da carga. A carga foi modelada por uma parcela linear e outra não linear. Utilizando a corrente média na frequência de 60 Hz das medições, foi modelada a impedância da carga e conforme recomendado pela IEEE 519 [2], as harmônicas foram representadas por fontes de corrente em paralelo nas demais frequências, onde cada ordem harmônica foi representada por uma fonte de corrente com seu respectivo valor de pico fornecido pelo medidor.

A impedância da fase A foi modelada conforme equação 4.10, considerando a tensão na fase A como sendo  $220 \angle 0$  V e a corrente média na frequência fundamental de  $54,25 \angle 320$  A.

$$Z_a = \frac{220 \angle 0}{54,25 \angle 320} = 3,1065 + 2,6066\Omega \quad (4.10)$$

Com o valor de impedância obtido na equação 4.10, são encontrados os valores do resistor e indutor que representam a carga linear da fase A, observando um comportamento indutivo da carga.

Com base na equação (4.11), é encontrado o indutor da carga, utilizando a frequência de 60 Hz.

$$L = \frac{Xl}{w} = \frac{2,6066}{2 * \pi * 60} = 6,914mH \quad (4.11)$$

O valor do resistor da carga é dado por:

$$R = 3,1065\Omega \quad (4.12)$$

Para as fases B e C os cálculos para determinar os valores dos componentes da carga são idênticos, segue os cálculos para as duas fases restantes:

Na fase B, a tensão é de 220∠240 V e a corrente média registrada na frequência de 60 Hz em todo período de monitoramento foi de 34,31∠320 A, com base nesses valores, utilizando a equação 4.10 é possível obter o valor da impedância  $Z_b$ , conforme (4.13):

$$Z_b = \frac{220 \angle 240}{34,31 \angle 200} = 4,9119 + 4,12\Omega \quad (4.13)$$

Observando o resultado obtido para impedância da fase B, verifica-se que essa carga tem comportamento indutivo semelhante à fase A. Os valores da resistência e da reatância, respectivamente, são encontrados pelas equações 4.14 e 4.15:

$$R = 4,9119\Omega \quad (4.14)$$

$$L = \frac{Xl}{2 * \pi * 60} = \frac{4,12}{2 * \pi * 60} = 10,92mH \quad (4.15)$$

Na fase C, a tensão é de 220∠120 V e a corrente média em 60 Hz registrada foi de 36,50∠80 A. Com base nesses valores, e utilizando as equações 4.10 e 4.11, são obtidos os valores do resistor e indutor da carga, equações 4.16 e 4.17, respectivamente.

$$R = 4,6172\Omega \quad (4.16)$$

$$L = 10,276mH \quad (4.17)$$

Os valores obtidos dos componentes da parte linear da carga estão apresentados na tabela 4.1:

TABELA 4.1  
Valores dos componentes da parte linear da carga

Fase A		Fase B		Fase C	
R	L	R	L	R	L
3,1065 $\Omega$	6,914 <i>mH</i>	4,9119 $\Omega$	10,92 <i>mH</i>	4,6172 $\Omega$	10,276 <i>mH</i>

Para a modelagem das fontes de corrente em paralelo, conforme [2], foram utilizados os valores de pico das correntes harmônicas fornecidas pelo medidor. Na tabela 4.2 são apresentados os valores utilizados para realizar a modelagem da parcela não linear da carga:

TABELA 4.2  
Distorção harmônica individual de corrente (A)

Freq. (Hz)	Fase A	Fase B	Fase C
60	54,25	34,31	36,50
180	5,36	7,78	6,47
300	1,81	4,80	3,60
420	1,12	2,45	1,91
540	0,48	1,50	1,00
660	0,32	1,00	0,94
780	0,22	0,68	0,53
900	0,11	0,46	0,40
1020	0,19	0,31	0,25
1140	0,22	0,26	0,26
1260	0,09	0,28	0,30
1380	0,09	0,22	0,14
1500	0,08	0,12	0,13

Portanto, com base nos componentes encontrados para a parte linear da carga, e utilizando os valores da tabela 4.2 para modelar as fontes de corrente, a Figura 4.1 representa a carga modelada:

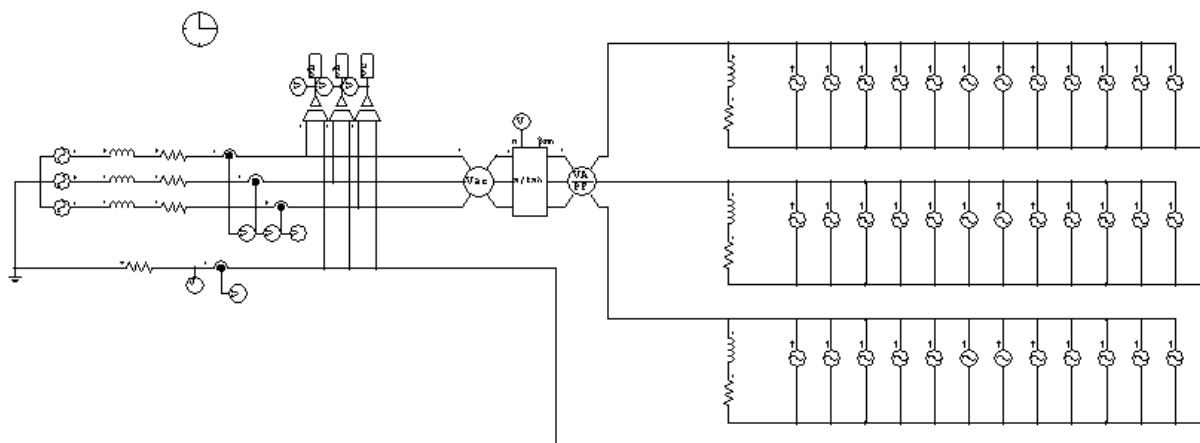


Figura 4.1: Carga modelada no software Psim.

As Figuras 4.2 e 4.3 são referentes a uma comparação com o espectro da carga modelada com o espectro real das medições, baseado nos valores de distorções harmônicas presentes na tabela 4.1. É possível observar que os espectros são semelhantes.

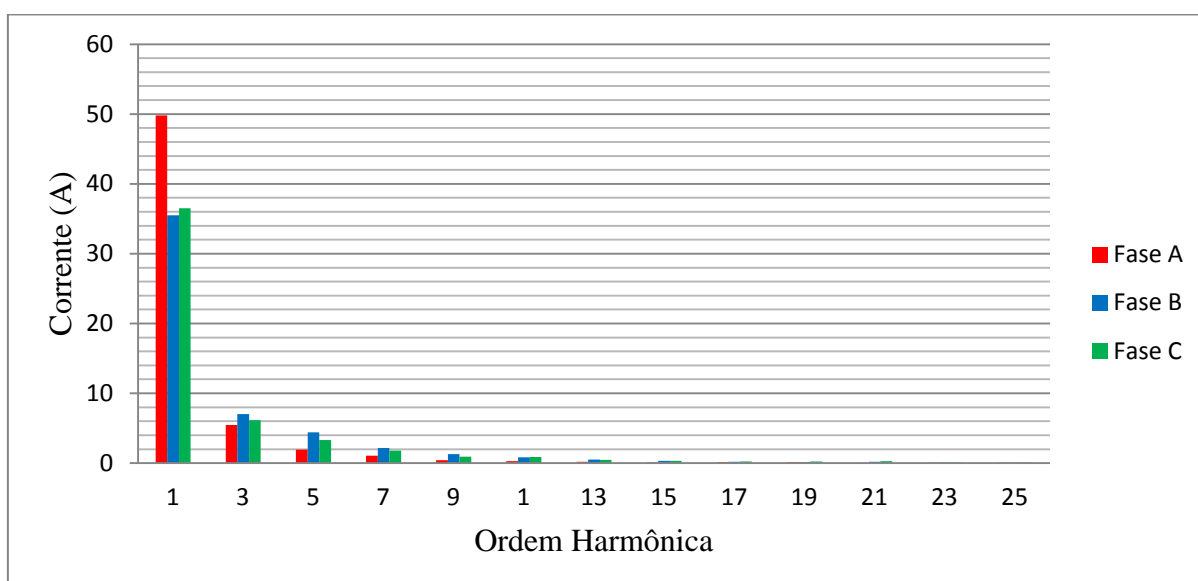


Figura 4.2: Espectro de corrente da carga modelada

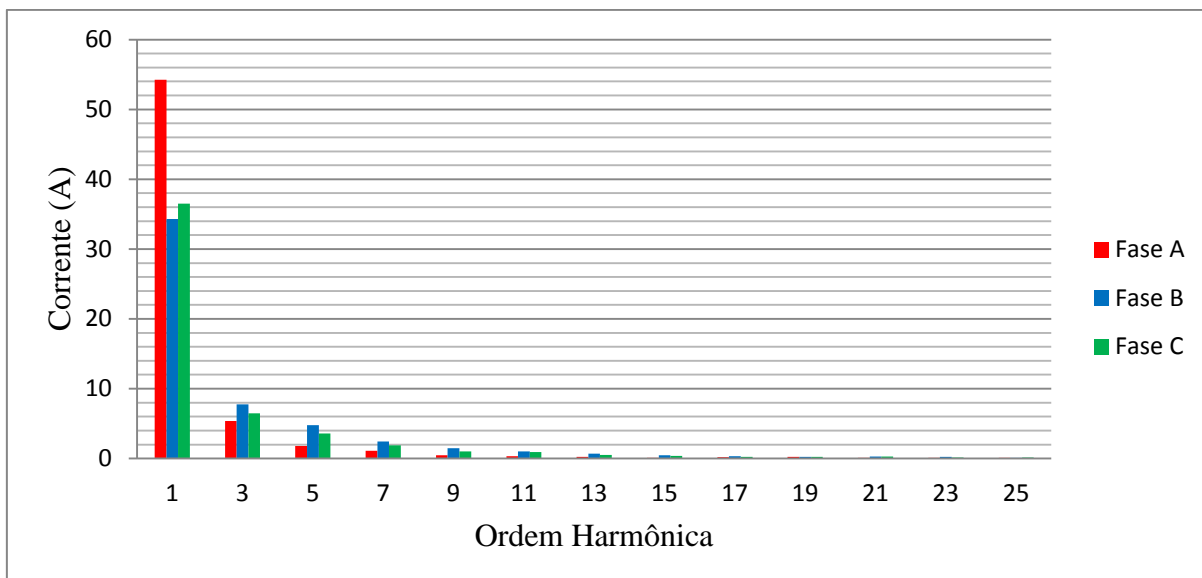


Figura 4.3: Espectro da carga real, com base nos valores da Tabela 4.1.

## 4.2 Projeto do Filtro Ativo Paralelo

A Figura 4.4 apresenta o diagrama em blocos básico de um filtro ativo paralelo de potência. Nesta figura o sistema trifásico está representado por uma fonte de tensão. O filtro paralelo é representado pelo inversor de tensão (VSI – Voltage Source Inverter) e seu controle. Este inversor funciona com malha de controle de corrente e tem a função básica de “injetar” as correntes indesejadas, consumidas pela carga.

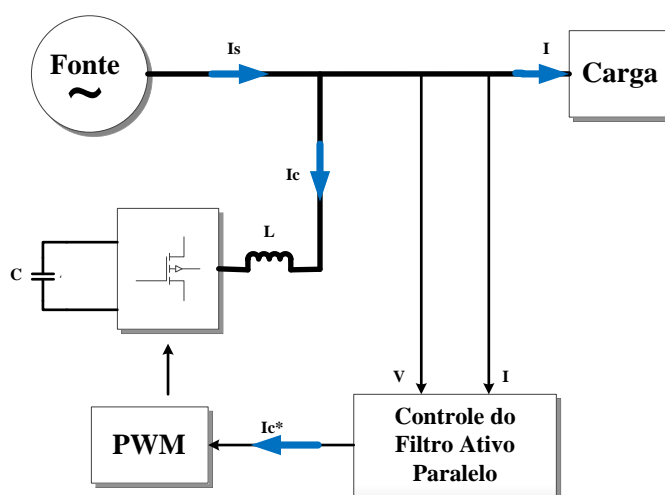


Figura 4.4: Filtro ativo paralelo



#### 4.2.1 Geração das correntes de referência

Conforme abordado no Capítulo 2, para o projeto do filtro ativo é necessária a geração das correntes de referências para que o filtro sintetize apenas as correntes indesejáveis. Portanto para gerar estas referências foi utilizada a Teoria das Potências Instantâneas proposta por [14]. A Figura 4.5 demonstra o sistema implementado no *software PSim* para geração das correntes de referência:

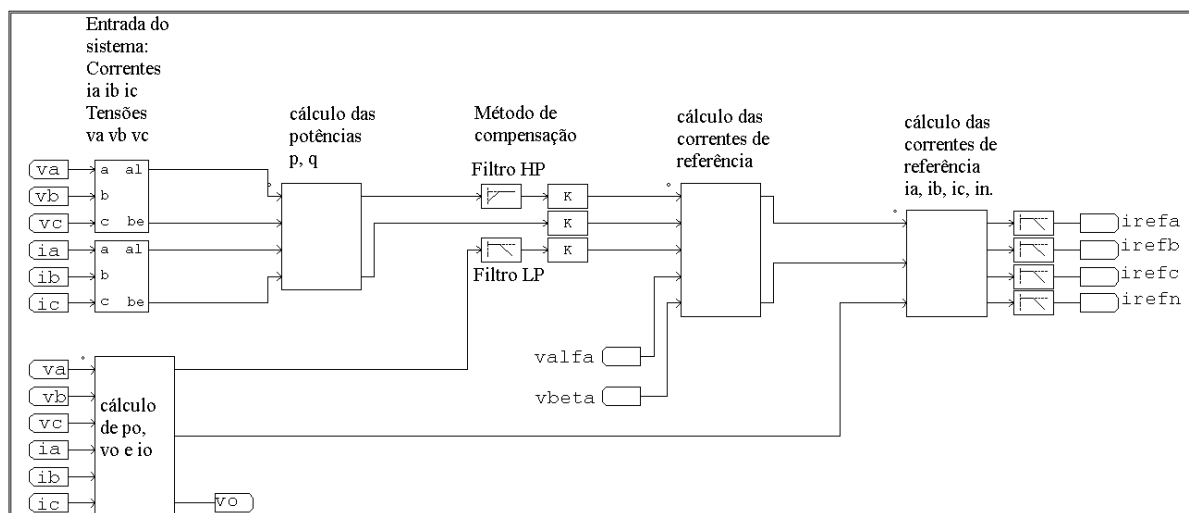


Figura 4.5: Esquema implementado no Psim para geração de referências

Os cálculos das potências  $p$ ,  $q$ ,  $p0$  e das correntes de referência foram implementados utilizando blocos de linguagem C, utilizando a lógica descrita no Cap. 2.

Primeiramente é realizada a leitura das tensões de fase  $Va$ ,  $Vb$ ,  $Vc$  e das correntes na carga  $ia$ ,  $ib$ ,  $ic$  e estas são transformadas para as coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ -0. Nas novas coordenadas é realizado o cálculo das potências instantâneas  $p$ ,  $q$  e  $p0$  conforme Eq. 2.3. Como foi verificado no Cap. 3, analisando a qualidade de energia no prédio da Universidade, foi constatado que os principais problemas em relação à qualidade de energia são:

- Harmônicas de corrente fora dos limites;
- Média do Fator de potência abaixo do limite;
- Elevada corrente no neutro devido ao desbalanceamento entre as fases.

Portanto, o principal objetivo do filtro é compensar estes problemas de qualidade de energia elétrica para que os indicadores de qualidade de energia estejam dentro dos limites

estipulados pelas normas. Então as potências que deverão ser compensadas, conforme Eq. 4.18, são:

- A potência oscilante ( $\tilde{p}$ ), responsável pela parte da potência que contém os harmônicos;
- A potência imaginária ( $q$ ), responsável pela soma das potências  $\bar{q}$  e  $\tilde{q}$ ;
- E a potência de sequência zero ( $\bar{p}_0$ ), responsável pelo desequilíbrio da carga e, conseqüentemente, corrente no neutro.

Então, conforme [15], a geração das correntes de referência é realizada com base nessas potências que deverão ser compensadas, conforme Equação 4.18.:

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & -v_\beta \\ v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p} - \bar{p}_0 \\ q \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Para comprovar a eficácia do método de geração de referências e verificar se o projeto realizado está sintetizando as correntes desejadas foram realizadas algumas simulações. Para realizar estas simulações o filtro foi implementado por fontes de corrente ideais conforme mostrado na Figura 4.6, onde estas injetam diretamente a corrente de referência na rede.

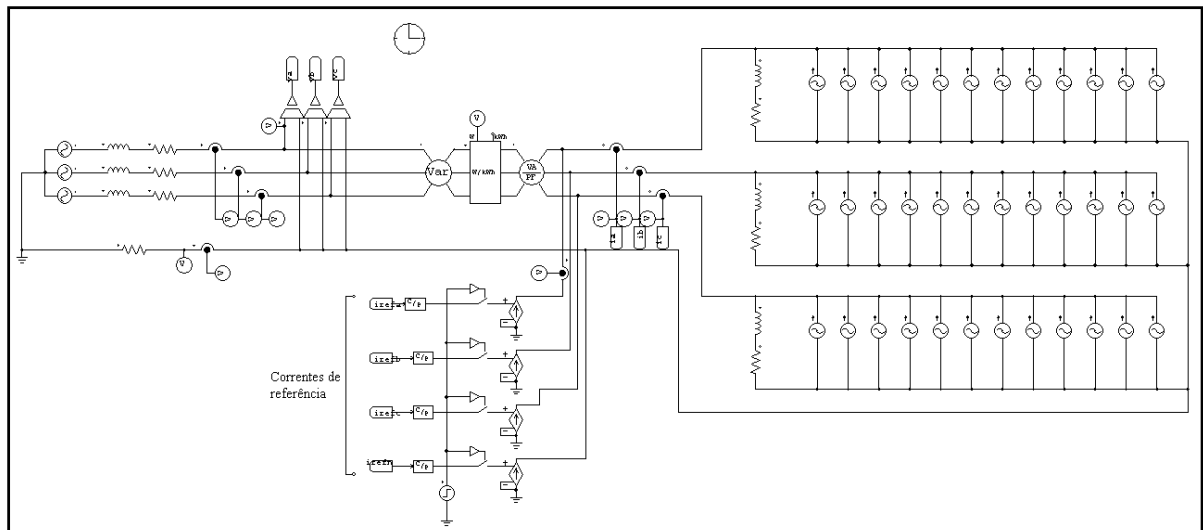


Figura 4.6: Fontes de corrente substituindo o FAP

A primeira simulação realizada para verificar o funcionamento da geração de referências, foi com uma carga somente resistiva e balanceada. Neste caso o resultado esperado é que as

correntes de referência fiquem em zero, pois não há componentes reativas e harmônicas para compensar. Portanto o resultado da simulação está apresentado na Figura 4.7.

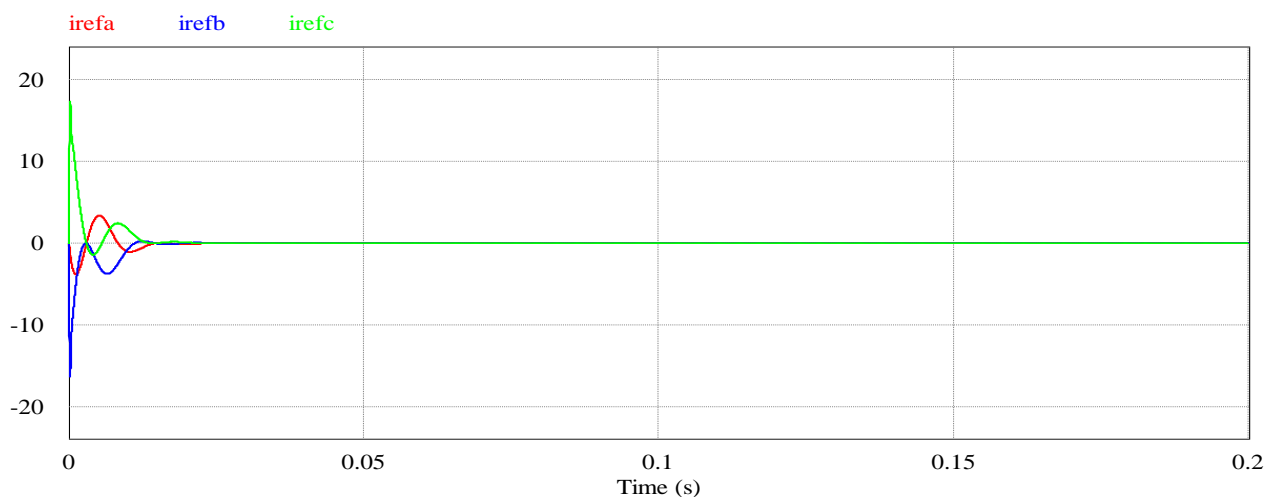


Figura 4.7: Correntes de referência quando a carga é linear (60Hz) e balanceada.

Como esperado, as correntes de referência permaneceram em zero, portanto foi constatado que o método estava funcionando corretamente. Depois de feito o teste, foi realizada a simulação com a carga modelada do prédio em estudo, o resultado pode ser observado na figura 4.8:

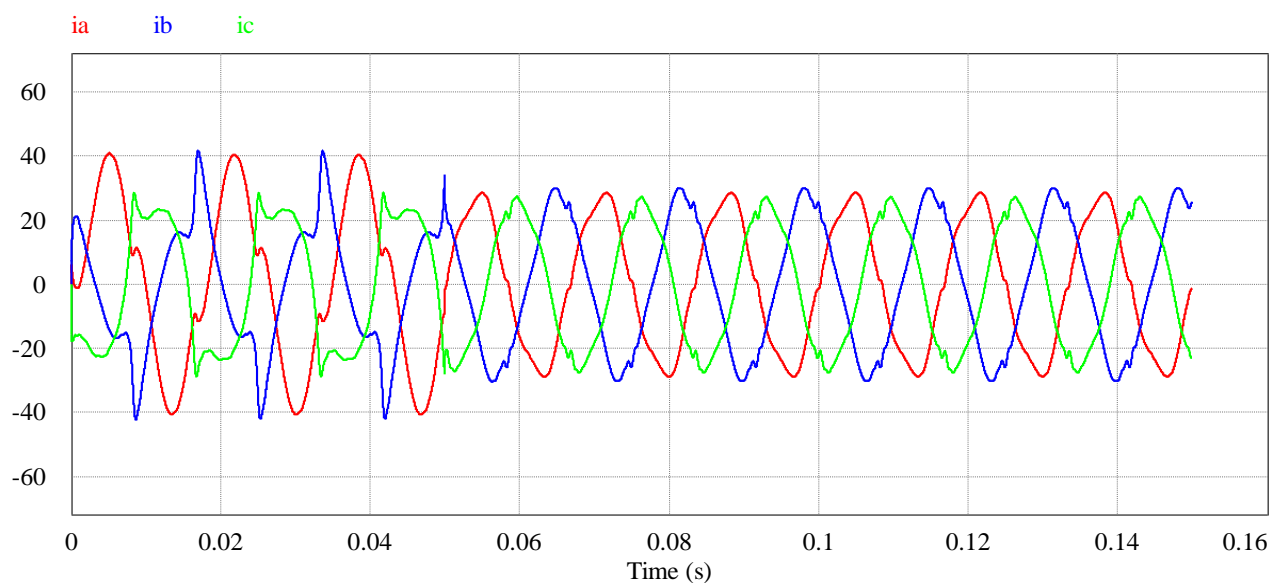


Figura 4.8: Correntes nas 3 fases, com a carga modelada

A Figura 4.8 representa a simulação das correntes fornecidas pela fonte, onde é possível observar, no tempo igual a 0,5 s, o momento em que as fontes de corrente começam a injetar as correntes de referência na rede. Nota-se que com o filtro em funcionamento, as correntes se aproximaram de uma forma de onda senoidal, contendo essencialmente frequência de 60 Hz. Isso ocorre por que a corrente injetada pelo “filtro ideal” é a corrente não senoidal que a carga consome com fase oposta, portanto as correntes nas frequências diferentes de 60 Hz se anulam.

O objetivo do filtro não é apenas filtrar harmônicos, mas também desbalanceamento e potência reativa. Portanto a Figura 4.9 apresenta o comportamento da corrente de neutro, antes e depois do “filtro ideal” entrar em funcionamento.

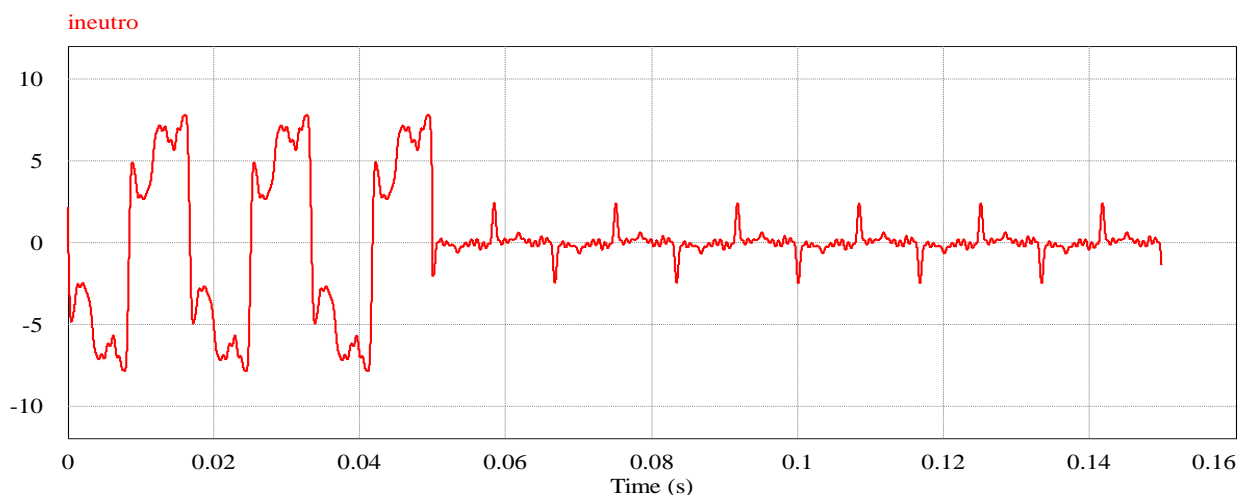


Figura 4.9: Comportamento da corrente de neutro com o filtro em operação

Observando a figura 4.9, a corrente de neutro é praticamente conduzida à zero, com picos indesejáveis devido ao grande desbalanceamento da carga.

A Figura 4.10 apresenta a compensação de potência reativa, onde é possível notar que o fator de potência que estava em um valor médio de 0,88, após o “filtro ideal” entrar em funcionamento o FP foi totalmente compensado.

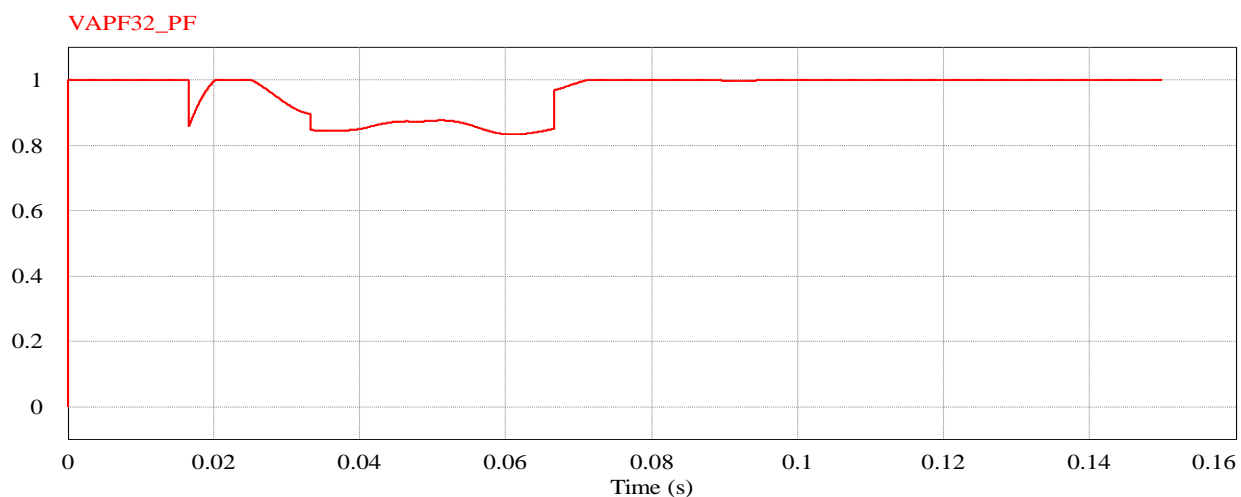


Figura 4.10: Fator de Potência

#### 4.2.2 Circuito de potência do filtro ativo paralelo

A parte responsável injetar as correntes de referência na rede é o circuito de potência do filtro, que corresponde a um inversor PWM com oito chaves eletrônicas do tipo IGBT e quatro circuitos do tipo RL nos terminais do inversor. O inversor utilizado no projeto é do tipo fonte de tensão (VSI) e este atua na rede como uma fonte de corrente controlada. A Figura 4.11 descreve a estrutura do inversor de tensão:

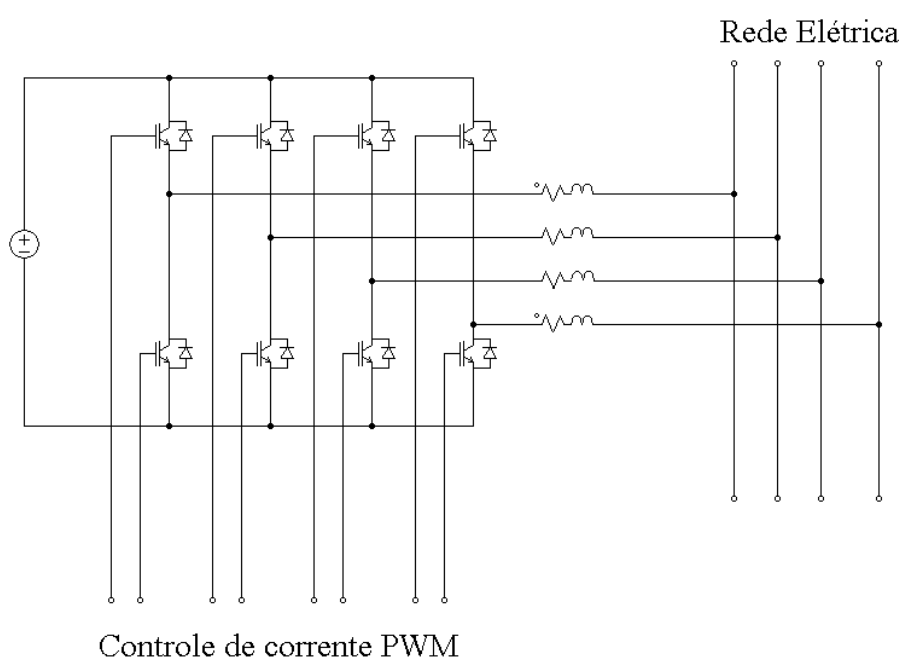


Figura 4.11: Inversor PWM

Como pode ser observado na Figura 4.11, a conexão do inversor com a rede é feita por meio de indutores, os quais filtram as harmônicas de comutação. Os diodos presentes no inversor garantem a direção correta do sentido da corrente, necessária para a correta operação do inversor.

#### 4.2.3 Controle do filtro ativo paralelo

Após o cálculo das correntes de referência utilizando a Teoria p-q, o objetivo é injetar estas correntes na rede elétrica para realizar a compensação desejada. Como descrito na figura 2.1, o filtro ativo é composto basicamente de um inversor de tensão e seu controle, o qual é responsável pela função de injetar as correntes de referência. Portanto é necessário realizar o controle do inversor de tensão, para que este faça o papel de uma fonte de corrente controlada, compensando as correntes indesejáveis.

Há inúmeras maneiras de realizar o controle do inversor de tensão. Como alguns dos métodos pode-se citar o controle por modelo de referência desenvolvido por [19], e o controle PWM linear, descrito em [23].

Conforme [23], o controle PWM linear do conversor paralelo utiliza três controladores do tipo PI (Proporcional-Integrador) produzindo os sinais de controle. Estes sinais serão sintetizados de acordo com a lógica de chaveamento desejada. Conforme descrito em [23] a parte integral do compensador PI é responsável por minimizar os erros nas baixas frequências e a parte proporcional é correlacionada com a magnitude do *ripple* observado no sinal em questão. Os erros gerados pela diferença entre as correntes de referência geradas através da teoria p-q e as correntes na saída do inversor servem de entrada para o controlador PI, resultando nos sinais de controle PWM. Estes sinais de saída são então comparados com uma portadora triangular com uma frequência fixa.

Neste trabalho será abordada a lei de controle por modelo de referência descrita por [19]. No controle por modelo de referência, devem-se atender determinados requisitos que podem ser obtidos em [19]. Este modelo descreve as características de entrada e saída desejada para a planta em malha fechada. O objetivo do controle por modelo de referência é encontrar a lei de controle que altera os parâmetros e a dinâmica da planta, para que a saída da estrutura de controle seja exatamente igual ao modelo de referência. Ou seja, se tratando do FAP, deve ser implementado um controle para que o inversor de tensão sintetize uma corrente exatamente igual a corrente de referência gerada através da Teoria p-q.

Conforme descrito em [19], considerando uma planta de primeira ordem dada pela Equação (4.19):

$$\dot{y} = ap \cdot y(t) + bp \cdot u(t) \quad (4.19)$$

E o modelo de referência expresso pela equação (4.20):

$$\dot{ym}(t) = -am \cdot ym(t) + bm \cdot r(t) \quad (4.20)$$

Quando os parâmetros  $ap$  e  $bp$  da equação (4.19) não são conhecidos, o objetivo do controle descrito na Equação (4.20) pode ser satisfeito utilizando o controlador da Equação (4.21):

$$u(t) = K1 \cdot y(t) + K2 \cdot r(t) \quad (4.21)$$

Onde  $K1$  e  $K2$  são constantes encontradas com base no modelo de referência descrito na Equação 4.20.

A seguir é realizado o projeto do controlador do FAP, com base na técnica de controle por modelo de referência descrita por [19].

Primeiramente é modelado o sistema de controle, conforme a Figura 4.12:

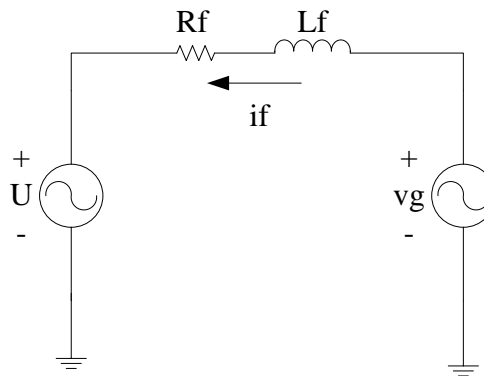


Figura 4.12: Circuito equivalente do controle do inversor

Onde  $Rf = 0,1\Omega$  e  $Lf = 0,002$  H, com base em [19].

Aplicando malha de tensão, é possível encontrar a Equação 4.22:

$$-u(t) - Lf \cdot \frac{dif}{dt} - Rf \cdot if + vg = 0 \quad (4.22)$$

Definindo a lei de controle descrita em 4.21:

$$u(t) = K1 \cdot if(t) + K2 \cdot if(t)' \quad (4.23)$$

Onde  $if(t)$  é a corrente de saída do sistema e  $if(t)'$  é referente à corrente de referência.

Substituindo (4.23) em (4.22), temos:

$$\frac{dif}{dt} = -\frac{Rf \cdot if}{Lf} - \frac{1}{Lf} \cdot (K1 \cdot if + K2 \cdot if') \quad (4.24)$$

O termo  $vg$  presente na Eq. 4.22 foi desprezado para facilitar os cálculos, entretanto ele será somado ao termo  $u$  posteriormente, como é possível notar na Figura 4.13. Manipulando a Eq. (4.24) é possível encontrar a Eq.(4.25):

$$\frac{dif}{dt} = \left(-\frac{Rf}{Lf} - \frac{K1}{Lf}\right) \cdot if - \left(\frac{K2}{Lf}\right) \cdot if' \quad (4.25)$$

Observando a equação 4.25, é possível notar que ela tem a forma do modelo de referência descrito na equação 4.23, ou seja:

$$\frac{difm}{dt} = (am) \cdot if - (bm) \cdot if' \quad (4.26)$$

Onde no caso da equação (4.25):

$$am = \left(\frac{-Rf-K1}{Lf}\right) \quad (4.27)$$

$$bm = \frac{K2}{Lf} \quad (4.28)$$

Aplicando a transformada de Laplace na equação (4.26), resulta na equação (4.29):

$$S \cdot ifm(s) = am \cdot ifm(s) - bm \cdot if(s)' \quad (4.29)$$

A partir da equação 4.29, é possível chegar à seguinte função de transferência:

$$\frac{ifm(s)}{if(s)'} = \frac{-bm}{S-am} \quad (4.30)$$

Analisando a equação (4.30), é desejável que a função de transferência seja igual a 1 (um), assim a saída do sistema vai ser igual a entrada, principal objetivo desta técnica de controle. A função de transferência tem um polo em  $(S - am = 0)$ , ou seja,  $(am = -S)$ .

Como as frequências que se deseja atenuar no projeto do filtro não ultrapassam o limite de 1500 Hz, é projetado um polo para esta frequência, conforme Eq. 4.31:

$$am = -jw$$

$$am = -2 \cdot \pi \cdot 1500$$

$$am = -9424,77 \quad (4.31)$$



Para que a função de transferência descrita em (4.30) seja igual ao valor 1 (um),  $bm$  deve ser igual a  $-am$ , então:

$$bm = 9424,77 \quad (4.32)$$

Finalmente, conforme [19], tendo os valores de  $am$  e  $bm$ , e utilizando as equações 4.27 e 4.28, é possível encontrar as constantes  $K1$  e  $K2$ .

$$K1 = am \cdot Lf - Rf \quad (4.33)$$

$$K1 = (9424,77 \cdot 0,002) - 0,1$$

$$K1 = 18,7495$$

$$K2 = bm \cdot Lf \quad (4.34)$$

$$K2 = -0,002 \cdot 9424,77$$

$$K2 = -18,84$$

Aplicando as equações 4.33 e 4.34 em 4.26, resulta na Equação 4.35:

$$u(t) = 18,7495 \cdot if(t) - 18,84 \cdot if(t)' \quad (4.35)$$

O diagrama de blocos da Figura 4.13 demonstra o esquema básico da técnica de controle utilizada:

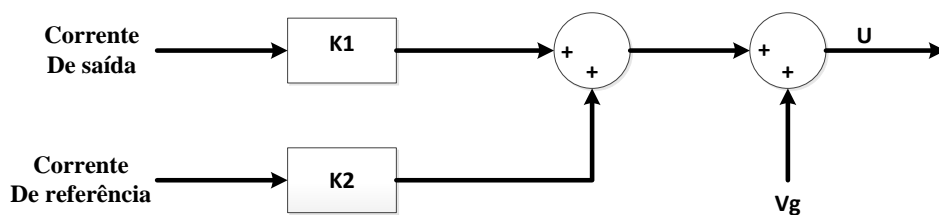


Figura 4.13: Diagrama de blocos da técnica de controle

A Figura 4.14 demonstra a técnica de controle implementada no *software*, onde é possível notar que a corrente de saída é somada à corrente de referência, com seus respectivos ganhos calculados em 4.33 e 4.34. Após esta soma é realizada a soma com a tensão  $Vg$  que havia sido desconsiderada na Equação 4.24 para facilitar os cálculos. Testada a técnica de controle foi verificado que o erro estava elevado para as harmônicas de 3ª e 5ª ordem quando comparados

o sinal de saída com o sinal de entrada. Então, conforme [20], foram adicionados filtros ressonantes nestas frequências para minimizar os erros.

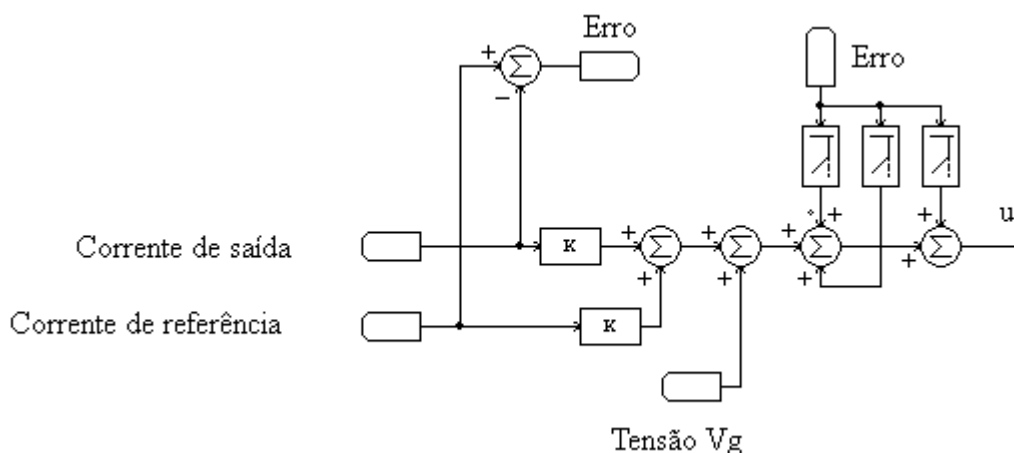
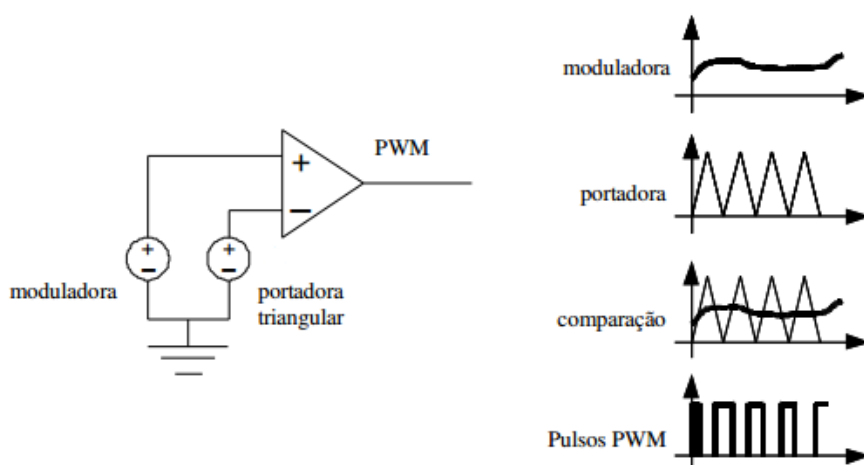


Figura 4.14: Técnica de controle

Após obtido o sinal de controle “u”, foi necessário utilizar uma técnica de modulação, para que o inversor de tensão realizasse o chaveamento corretamente. A técnica de modulação utilizada foi a modulação por largura de pulso (PWM).

A modulação é um processo de variação de um sinal modulador, àquele que se deseja reproduzir, através da influência de um sinal portador [21]. Os inversores de tensão operam com comutação de estados, ou seja, seus interruptores alteram os estados entre a condição de condução e bloqueio. Desta forma, a modulação PWM opera na essência dos inversores de tensão, pois tem como resultado os pulsos de comando dos interruptores. Estes comutam entre os estados de condução e bloqueio, assim como os pulsos da modulação PWM.

Há várias formas de se obter a modulação PWM. A técnica utilizada neste trabalho é através da comparação da onda moduladora com uma portadora. A Figura 4.15 ilustra a modulação PWM obtida dessa forma.



Fonte: Telecomunicações: transmissão, recepção, AM-FM sistemas pulsados, 1985.

Figura 4.15: Formação dos pulsos de comando com modulação PWM

No projeto, o sinal obtido através da técnica de controle é comparado com uma portadora triangular com frequência fixa em 10 kHz, o que força o conversor paralelo a chavear com uma frequência fixa de 10 kHz.

### 4.3 Resultados de Simulação

Com todo o projeto do filtro realizado, incluindo a parte de geração de referências, inversor de tensão e controle do inversor de tensão, o próximo passo foi realizar as simulações com o filtro implementado na rede elétrica. A figura 4.16 apresenta o projeto completo do filtro ativo paralelo:

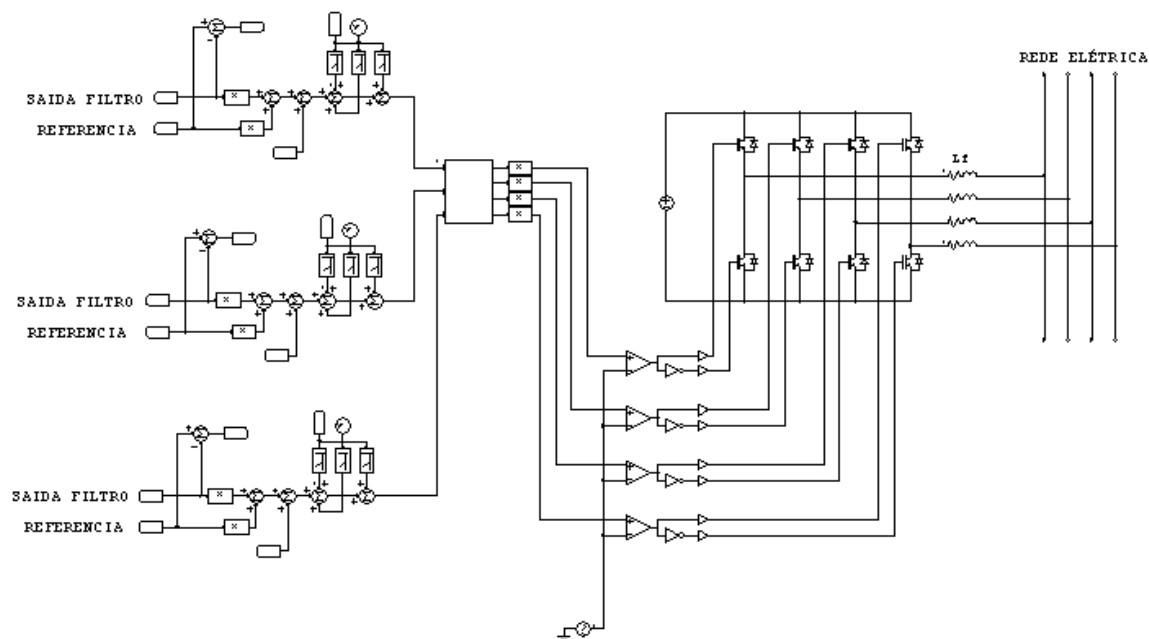


Figura 4.16: Projeto do filtro ativo paralelo

A seguir, são demonstrados os resultados obtidos nas simulações. Primeiramente foi realizada a simulação das correntes nas três fases, conforme Figura 4.17:

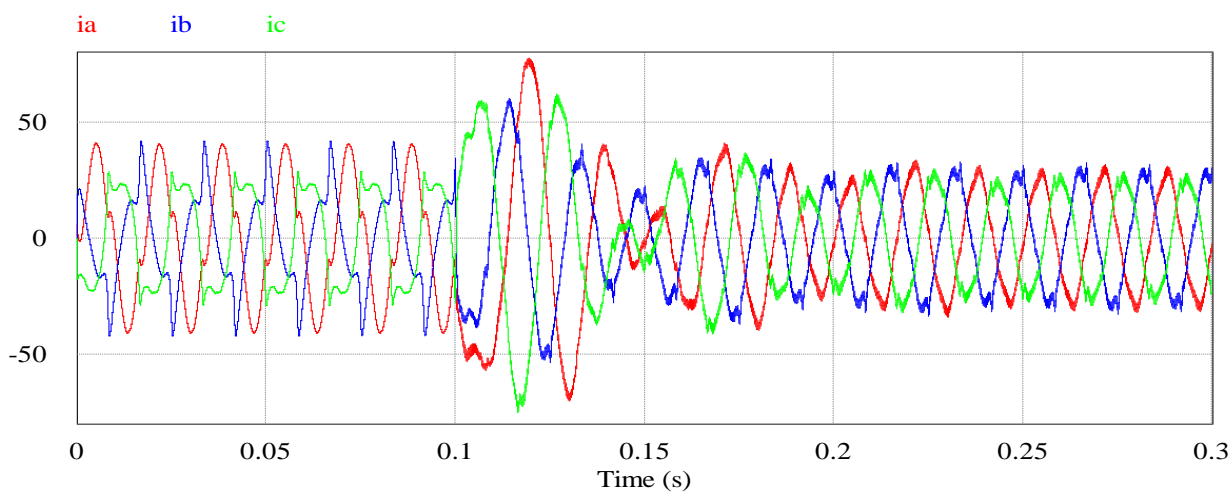


Figura 4.17: correntes nas 3 fases

Na Figura 4.17 é possível notar que o filtro entra em funcionamento no tempo igual a 0,1 segundos. Neste momento ocorre o transitório das correntes, isso acontece devido ao filtro ter seu sistema de controle, o qual possui filtros e outros elementos que se comportam como elementos armazenadores de energia, responsáveis pelo transitório. O transitório dura aproxima-

damente 0,1 segundo e após este tempo o filtro começa a operar em regime permanente, compensando os harmônicos das correntes, e minimizando o desbalanceamento das fases.

Nas Figuras 4.18 e 4.19 é possível observar as formas de onda com mais clareza com apenas 0,1s de simulação em regime permanente. A Figura 4.18 apresenta as formas de onda antes de o filtro entrar em funcionamento. Nota-se o elevado conteúdo harmônico presente, fazendo com que as formas de onda fiquem bem distorcidas. Na figura 4.19 é possível observar as formas de onda com o filtro em funcionamento, onde as formas de onda se aproximam de uma senoidal, com um conteúdo harmônico reduzido.

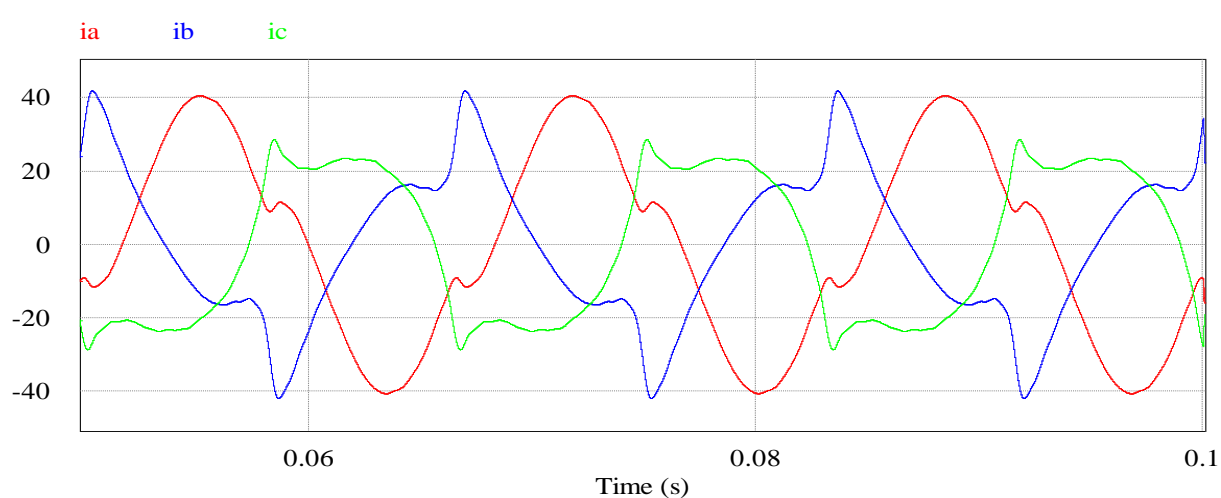


Figura 4.18: correntes nas 3 fases sem a compensação do FAP

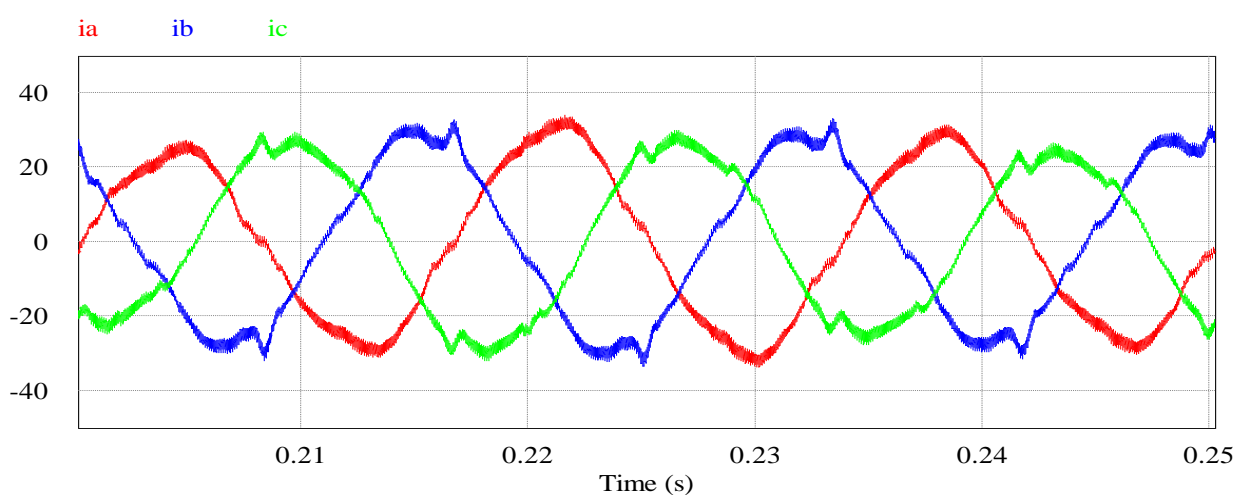


Figura 4.19: Corrente nas 3 fases com a compensação do FAP

Como apresentado na Figura 4.19, as correntes estão praticamente com a mesma amplitude, isso acontece por que a corrente de neutro foi compensada. Na Figura 4.20 é possível observar a corrente de neutro antes e depois do funcionamento do filtro.

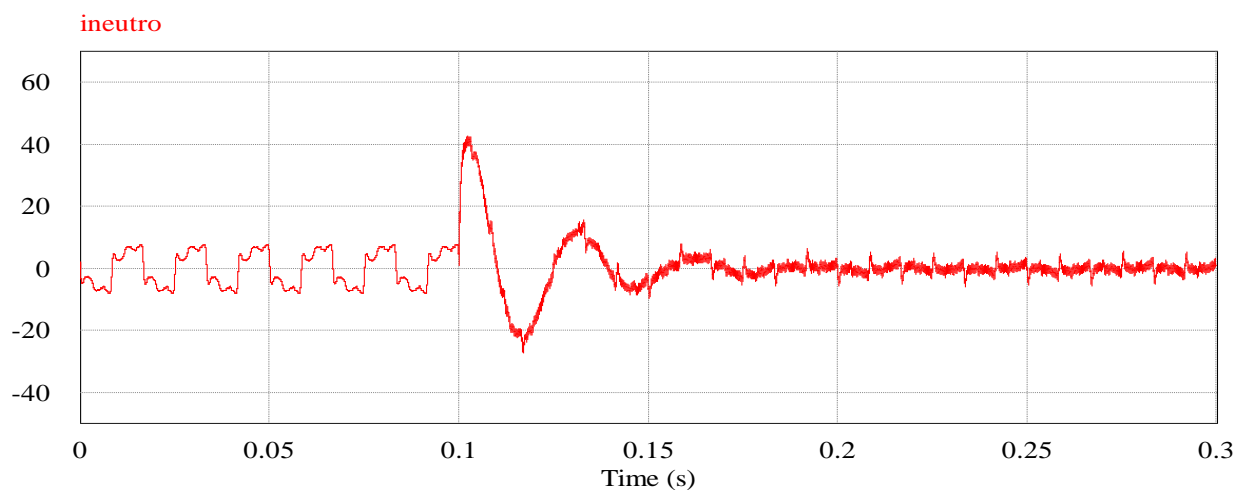


Figura 4.20: Corrente de neutro

Como o principal objetivo do filtro é a compensação das harmônicas, a seguir é realizada uma análise no domínio da frequência, comparando o espectro das correntes sem o filtro e com o filtro em funcionamento. A Figura 4.21 apresenta o espectro das correntes sem a compensação do filtro e a Figura 4.22 apresenta o espectro com o filtro em funcionamento.

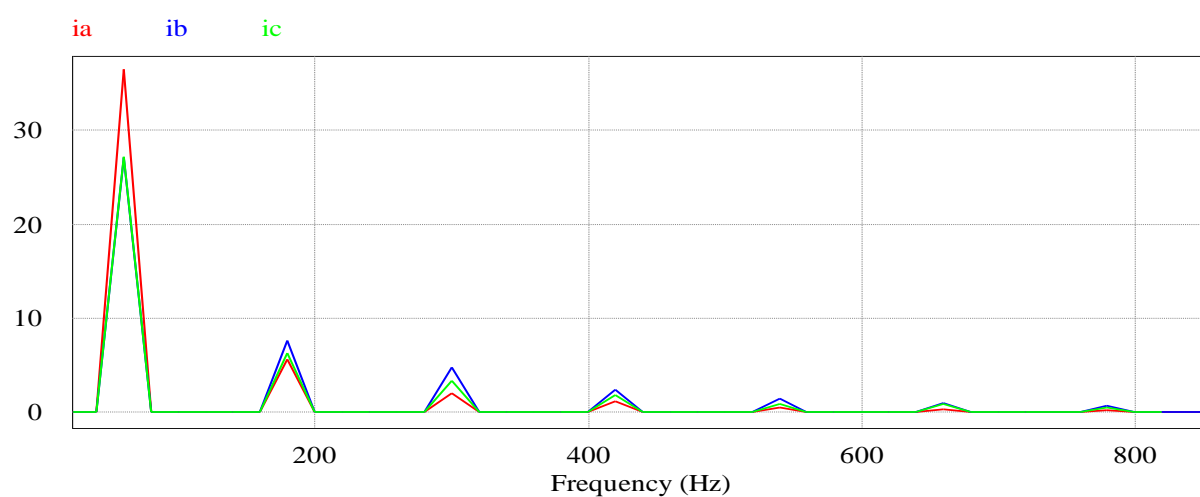


Figura 4.21: Espectro das correntes da linha sem o filtro

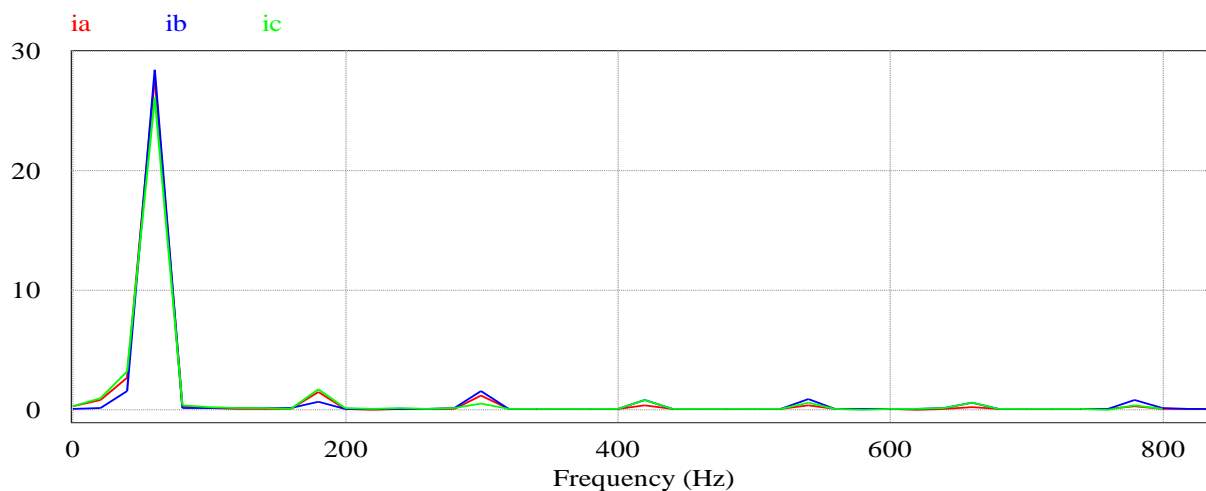


Figura 4.22: Espectro das correntes da linha com o filtro

É possível observar, comparando as figuras 4.21 e 4.22, que com o filtro em funcionamento as frequências múltiplas da fundamental foram consideravelmente compensadas, principalmente a 5<sup>a</sup> e a 7<sup>a</sup> harmônica. Os valores das correntes até a frequência de 1500 Hz estão descritos na Tabela 4.3, onde é realizada uma comparação das correntes com o filtro ligado e desligado.

TABELA 4.3  
Distorção harmônica individual (Valores simulados)

Harmônicas (Hz)	Distorção harmônica individual (A)					
	Filtro <i>OFF</i>			Filtro <i>ON</i>		
	A	B	C	A	B	C
60	36,2	26,9	27,01	27,7	28,3	26,1
180	5,76	7,51	6,03	1,45	0,65	1,69
300	1,92	4,36	2,93	1,15	1,49	0,49
420	0,94	1,94	1,27	0,35	0,77	0,77
540	0,32	0,99	0,53	0,32	0,80	0,56
660	0,31	0,76	0,75	0,18	0,56	0,54
780	0,28	0,65	0,60	0,26	0,78	0,33
900	0,23	0,56	0,58	0,04	0,31	0,42
1020	0,29	0,46	0,48	0,07	0,26	0,10
1140	0,33	0,41	0,49	0,28	0,25	0,35
1260	0,22	0,41	0,52	0,11	0,21	0,16
1380	0,22	0,35	0,37	0,12	0,24	0,13
1500	0,20	0,27	0,34	0,09	0,15	0,11

Após ter os resultados das simulações referente às correntes nas três fases com a compensação do filtro e sem o filtro, o próximo passo foi transformar estes valores para porcentagem da fundamental e comparar com os limites da recomendação IEEE [2], para verificar se os valores que estavam fora dos limites, agora com a compensação ativa, ficaram dentro dos limites.

A tabela 4.4 apresenta os valores das correntes em % da fundamental, e ao lado, o limite estipulado pela recomendação.



TABELA 4.4  
Distorção harmônica individual (% da fundamental)

Harmônicas (Hz)	Distorção harmônica individual (%)						Limite IEEE 519
	Filtro <i>OFF</i>			Filtro <i>ON</i>			
	A	B	C	A	B	C	
60	100	100	100	100	100	100	12
180	15,91	27,92	22,33	5,23	2,30	6,48	12
300	5,30	16,21	10,85	4,15	5,27	1,88	12
420	2,60	7,21	4,70	1,26	2,72	2,95	12
540	0,88	3,68	1,96	1,16	2,83	2,15	12
660	0,86	2,83	2,78	0,65	1,98	2,07	5,5
780	0,77	2,42	2,22	0,94	2,76	1,26	5,5
900	0,64	2,08	2,15	0,14	1,10	1,61	5,5
1020	0,80	1,71	1,78	0,25	0,92	0,38	5,5
1140	0,91	1,52	1,81	1,01	0,88	1,34	5
1260	0,61	1,52	1,93	0,40	0,74	0,61	5
1380	0,61	1,30	1,37	0,43	0,85	0,50	2
1500	0,55	1,00	1,26	0,32	0,53	0,42	2

É possível observar que com o filtro em funcionamento, as harmônicas que estavam fora dos limites (valores em vermelho), foram reduzidas significativamente, respeitando os limites impostos pela recomendação. Portanto o filtro ativo paralelo se mostrou uma ótima ferramenta no que diz respeito à compensação harmônica de corrente.

Com base nas análises do Capítulo 3, foi verificado por meio de medições que o fator de potência da instalação estava abaixo do limite estipulado pela norma. Portanto, um dos objetivos do filtro ativo paralelo foi de compensar a potência reativa consumida, levando o FP para o mais próximo de 1 (um). A Figura 4.23 apresenta o comportamento das potências fornecidas pela fonte de tensão trifásica.

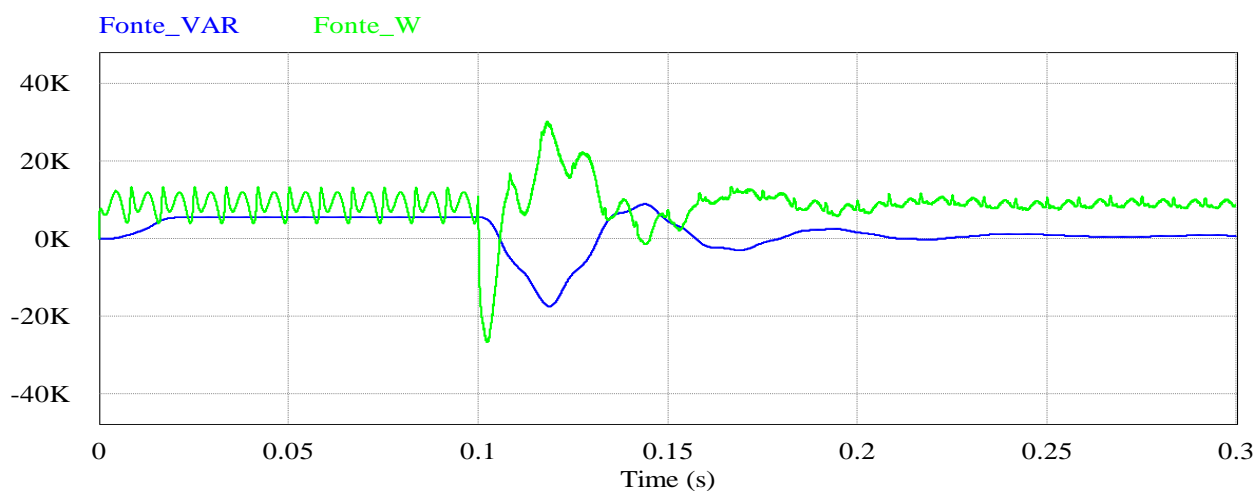


Figura 4.23: Potências Ativa e Reativa fornecidas pela fonte

Observando a Figura 4.23, é possível notar que a potência ativa consumida antes do filtro entrar em funcionamento tinha uma parcela bastante oscilante e após o filtro começar a compensar, em 0,1s, a parte oscilante é praticamente eliminada, parte responsável pelas harmônicas. A potência reativa, após o filtro entrar em funcionamento fica em torno de 0 VAR, ou seja, a fonte fornece apenas a potência ativa para a carga.

A figura 4.24 descreve o comportamento das potências fornecidas pelo filtro ativo. É possível observar que a média da potência ativa do filtro permanece praticamente nula, portanto o filtro não fornece potência para a carga. A pequena parcela de potência que é fornecida é devido as perdas envolvidas no sistema, como por exemplo perdas no inversor e nos indutores e resistores.

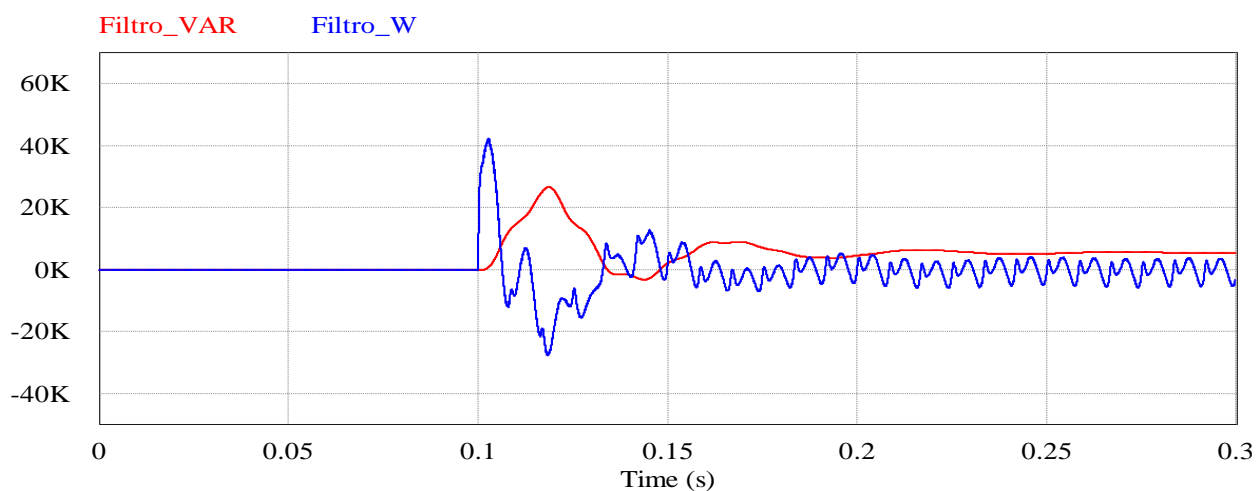


Figura 4.24: Potência Ativa e Reativa fornecidas pelo filtro

O fator de potência é apresentado na Figura 4.25. Antes do filtro entrar em operação, o FP é igual a aproximadamente 0,88 e após o filtro entrar em funcionamento o valor fica acima de 0,99. Portanto a potência reativa é praticamente toda compensada.

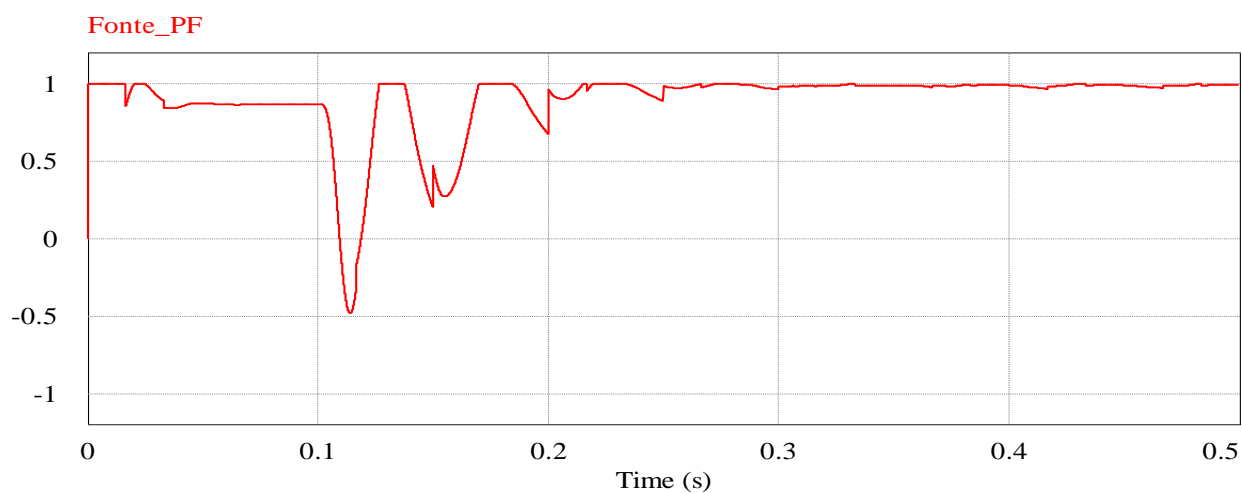


Figura 4.25: Fator de potência

#### 4.3.1 Simulação para um perfil da carga diferente

O filtro escolhido foi o filtro ativo paralelo em razão da carga não apresentar uma característica constante durante o dia, portanto o filtro com base nas leituras de tensão e corrente deve ser capaz de compensar os distúrbios mesmo com a carga variando. Com base nisso,

foram realizadas simulações para um perfil de carga mais crítico, com correntes mais elevadas para verificar o funcionamento do filtro.

A carga foi modelada novamente, agora com base em outros valores de medições. O método de modelagem da carga foi o mesmo descrito no subitem 4.1 do presente capítulo, portanto agora os valores serão somente apresentados, não será apresentado o passo a passo dos cálculos. A tabela 4.5 apresenta os dados de medições das distorções harmônicas de corrente que serviram de base para a carga ser modelada, e a tabela 4.6 apresenta os valores dos componentes da carga:

TABELA 4.5  
Distorção harmônica individual de corrente (A)

Freq. (Hz)	Fase A	Fase B	Fase C
60	76,73	48,53	51,62
180	7,59	11,01	9,15
300	2,55	6,79	5,10
420	1,58	3,47	2,70
540	0,68	1,98	1,42
660	0,45	1,42	1,33
780	0,31	0,96	0,75
900	0,16	0,66	0,57
1020	0,27	0,44	0,36
1140	0,31	0,36	0,41
1260	0,13	0,42	0,43
1380	0,13	0,34	0,16
1500	0,12	0,22	0,19

TABELA 4.6  
Valores dos componentes lineares da carga

Fase A = 76,73 A		Fase B = 48,53 A		Fase C = 51,62 A	
R	L	R	L	R	L
2,19 $\Omega$	4,88 mH	3,47 $\Omega$	7,72 mH	3,26 $\Omega$	7,26 mH

Realizada a modelagem da carga com as correntes mais elevadas, foram realizadas simulações das correntes compensadas e do fator de potência, Fig. 4.26 e Fig. 4.29.

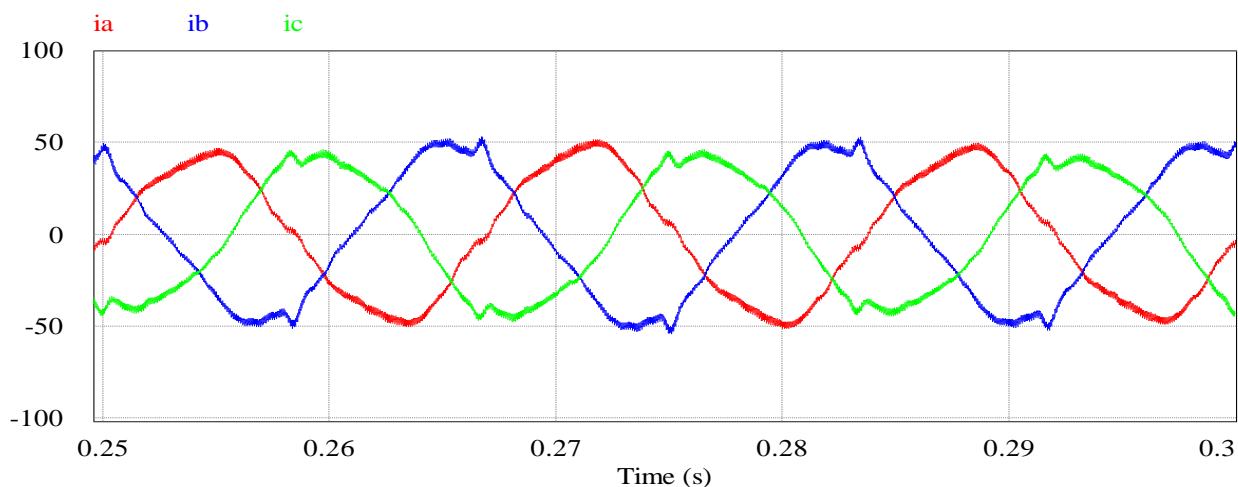


Figura 4.26: Correntes de linha compensadas

Observando o comportamento das correntes, nota-se que estão quase que totalmente balanceadas e próximas de uma senóide. As pequenas variações, que mesmo com a compensação do filtro ainda existem, são consequência da grande distorção da forma de onda consumida pela carga, visto que esta simulação foi realizada para valores de distorções harmônicas bem elevadas. As Figuras 4.27 e 4.28 apresentam, respectivamente, os espectros da corrente sem o filtro e com o filtro em operação.

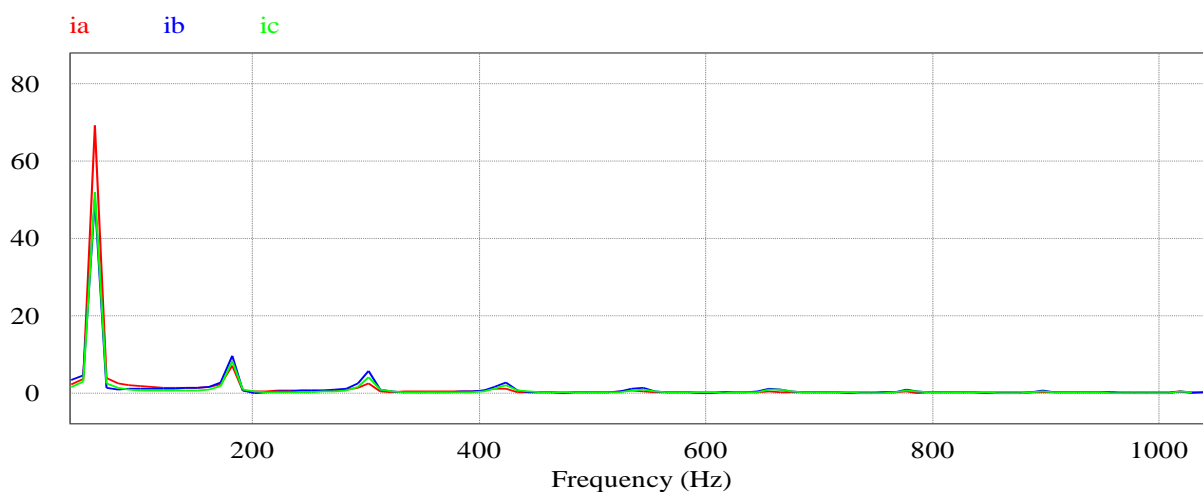


Figura 4.27: Espectro das correntes de linha sem a compensação do FAP

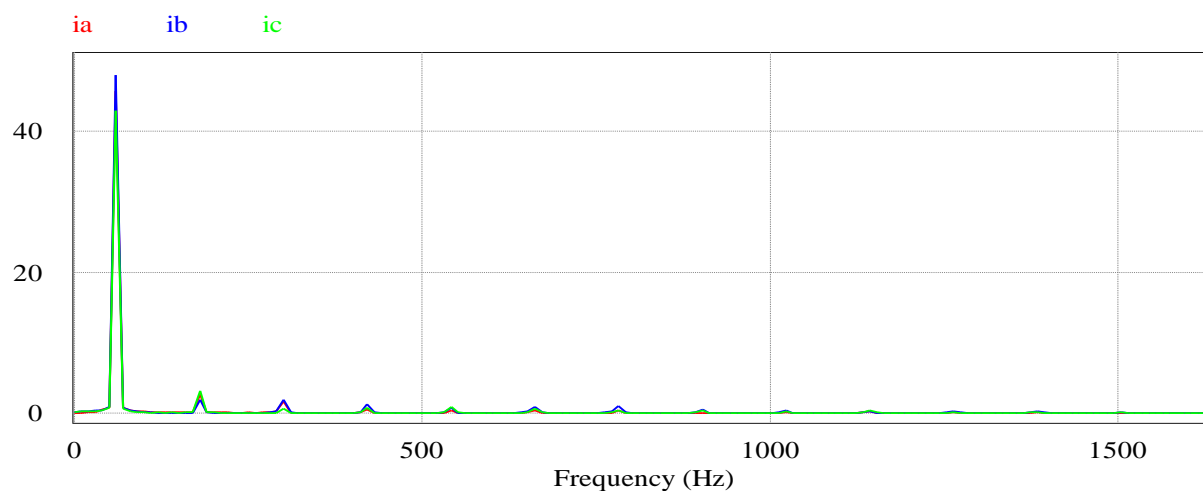


Figura 4.28: Espectro das correntes de linha com a compensação do FAP

Com base nos espectros apresentados, foram extraídos os valores de corrente para cada frequência, para comparar com a recomendação [2] e verificar se os valores estão dentro dos limites. A tabela 4.7 apresenta os valores das harmônicas e o limite estipulado pela recomendação IEEE 519 [2].

TABELA 4.7

Distorção harmônica individual de corrente (%)

Harmônicas (Hz)	Distorção harmônica individual (%)						Limite IEEE 519
	Filtro <i>OFF</i>			Filtro <i>ON</i>			
	A	B	C	A	B	C	
60	100	100	100	100	100	100	-
180	10,26	19,04	15,82	5,92	4,10	7,57	12
300	3,48	11,35	7,94	3,68	4,16	1,71	12
420	1,69	5,30	3,95	1,23	2,61	1,87	12
540	0,88	2,31	1,39	0,79	1,61	2,17	12
660	0,68	1,99	1,62	0,88	2,01	1,61	5,5
780	0,55	1,49	1,00	0,81	2,15	0,86	5,5
900	0,36	1,08	0,83	0,09	1,07	1,07	5,5
1020	0,51	0,76	0,58	0,92	0,94	0,63	5,5
1140	0,55	0,64	0,71	0,02	0,00	0,05	5
1260	0,27	0,72	0,71	0,22	0,44	0,35	5
1380	0,27	0,60	0,25	0,26	0,54	0,40	2
1500	0,25	0,36	0,31	0,11	0,19	0,23	2

Analisando os dados da tabela 4.7, observa-se que o filtro compensou perfeitamente as correntes harmônicas, pois os valores que estavam ultrapassando o limite foram minimizados com a compensação do filtro, não ultrapassando os limites impostos pela IEEE 519.

O fator de potência para este comportamento da carga estava abaixo do valor de 0,8, e após a compensação do filtro permaneceu acima de 1 (um), conforme Figura 4.29.

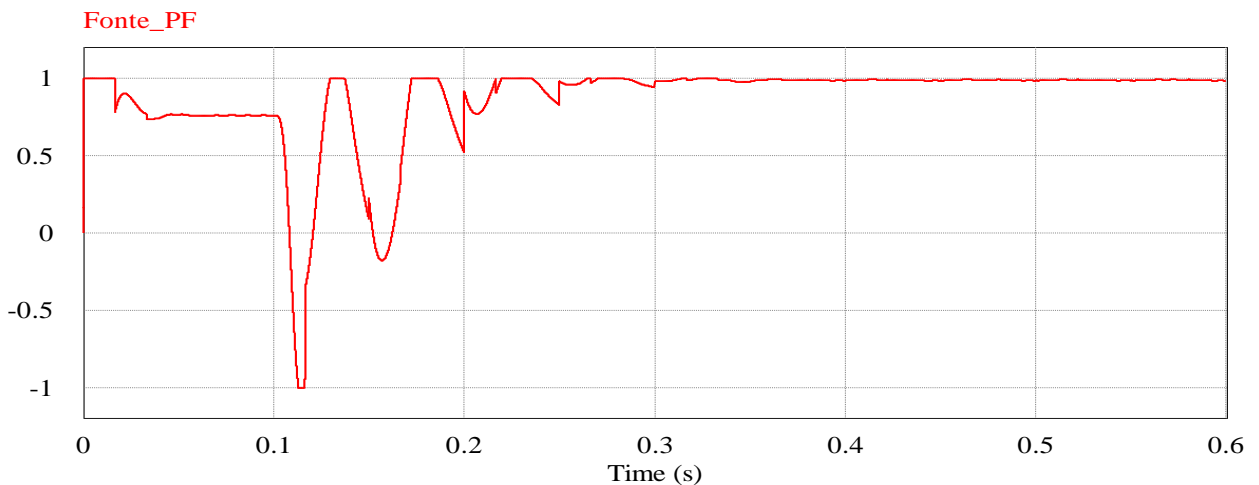


Figura 4.29: Fator de potência

#### 4.4 Conclusões Parciais

Neste capítulo foi realizada a modelagem da carga, onde foi possível observar que os resultados de simulação foram próximos ao real, comparando os espectros. Posteriormente foi realizado o projeto do filtro ativo paralelo utilizando a Teoria p-q para geração das correntes de referência e o controle por modelo de referência do inversor de tensão.

Foram realizadas diversas simulações, onde foi possível observar que com o filtro em funcionamento as harmônicas foram minimizadas, e o fator de potência e desbalanceamento também foram compensados. Portanto, com a adição do FAP, os principais distúrbios de qualidade de energia presentes na planta em análise foram minimizados.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram apresentadas algumas contribuições referentes à qualidade de energia elétrica, onde com base em medições em um ambiente universitário foi possível demonstrar que o perfil de carga presente neste caso é não linear. Portanto foi visto que no prédio universitário em análise, as distorções harmônicas de corrente não estavam dentro dos limites aceitáveis: o fator de potência estava abaixo do limite estipulado pela norma e a corrente de neutro era consideravelmente elevada o que está associado a inúmeras cargas não lineares monofásicas existentes.

Com base nos dados fornecidos pelo medidor foi realizada a modelagem da carga por uma parcela linear e por uma parcela não linear, esta modelada por fontes de corrente. Segundo trabalhos como [17], foi evidenciado que um ambiente universitário possui em sua maioria cargas do tipo inversor de tensão com filtro capacitivo, que são as fontes chaveadas presentes nos computadores e na maioria dos equipamentos eletrônicos. No entanto, no caso deste trabalho, a carga foi modelada por fontes de corrente devido à grande complexidade da modelagem por fontes de tensão, onde teriam que ser medidos todos os elementos presentes na instalação, para assim modelar cada elemento e depois unir todos para ter o perfil de carga real da planta. Entretanto, a modelagem por fontes de corrente se mostrou eficiente, pois os resultados de simulação foram próximos aos resultados reais.

A solução utilizada para os distúrbios de qualidade de energia encontrados foi a implementação de um filtro ativo paralelo. Este filtro foi escolhido devido a sua flexibilidade em relação à carga, pois com base nas medições foi demonstrado que a carga do ambiente universitário em estudo tem uma considerável variação durante o dia. O filtro utilizado se mostrou muito eficiente, pois depois de implementado na rede por meio de simulação, os valores de distorções harmônicas foram amenizados, permanecendo dentro da norma. Além disto, a corrente de neutro foi minimizada para praticamente zero, e o fator de potência que nas simulações era bem abaixo do limite estipulado pela norma, após o uso do filtro permaneceu próximo a 1.

Neste trabalho foi utilizada a Teoria das Potências Instantâneas para controle do filtro ativo. Esta teoria é bem mais abrangente do que apenas um algoritmo de controle, pois constitui uma base consistente para análise de circuitos elétricos em regime balanceado ou não e com



ou sem distorções. Os autores consideram esta teoria um ponto fundamental para o correto entendimento das aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência [13].

Com base nos resultados de simulação, a utilização de um filtro ativo paralelo para compensação de distúrbios se mostrou muito eficiente, portanto uma proposta para trabalhos futuros seria uma implementação real do filtro na rede elétrica do prédio da Universidade, o que não foi realizado neste trabalho devido à complexibilidade de uma implementação real e a grande demanda de tempo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA–ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional– PRODIST, módulo 8, 16/12/2008 Resolução 345/2008 da ANEEL.
- [2] IEEE Std. 519-1992, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, 1992.
- [3] Jeferson Prates Marques. Modelagem e análise do efeito de distorções harmônicas de computadores em sistemas de energia. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pampa
- [4] IEC std. 61000-4-7 (2002). General guide on harmonics and inter-harmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- [5] Rocha, Joaquim E. Glodziński G., Mascari, Pazinato. Fluxo Harmônico em planta comercial na presença de grupo gerador. 2010. DAELT-UTFPR, Universidade Tecnológica do Paraná, Paraná, 2010.
- [6] Schneider/procobre.2009.workshop instalações elétricas de baixa tensão-qualidade de energia elétrica harmônicas. Disponível em: <http://www.schneider-electric.com/site/home/index.cfm/br/>. Acesso em: 2 out.2011.
- [7] NASCIMENTO, C. F.; OLIVEIRA JÚNIOR, A. A. Compensation of the Harmonic Current Generated by Light Dimmers. VI Induscon, 2004.
- [8] Igor S. M., Francisco P., Tarso V. F., Benedito A.. Lâmpadas Fluorescentes e Distorções Harmônicas: Eficiência Energética e Qualidade de Energia Elétrica. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2006.
- [9] Ming Yin Chan, Ken K.F., Michael Fung, A Case Study Survey of Harmonic Currents Generated from a Computer Centre in an Office Building, Department of Building Services Engineering, Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Hong Kong, China, 2006.
- [10] Teixeira, D. Ângelo. Análise das distorções harmônicas: Estudo de caso de um sistema industrial. 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.
- [11] DELAIBA, A. C., The Effect of Harmonics on Power Transformers Loss of Life, 38th Midwest Symposium on Circuits and System, vol. 1, p.p. 933-936, Rio de Janeiro, 1995.
- [12] Moore, A. H., “Harmonics”. In: MILLER, T. J. E. Reactive Power Control in Electric Systems. New York, IEEE J. Wiley, 1982, p. 331 – 51.

[13] Edson H. Watanabe, Maurício Aredes, “Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS ”.

[14]H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, New Jersey: IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007.

[15] João Afonso, Carlos Couto, Júlio Martins, “Active Filters with Control Based on the p-q Theory”, IEEE Industrial Electronics Society Newsletter, vol. 47, nº 3, Sept. 2000, pp. 5-10.

[16]<http://www.fluke.com/fluke/brpt/Ferramentas-de-qualidade-de-energia/Corrente-trif%C3%A1sica/Fluke-1750.htm?PID=56030>

[17]Uiraçaba Abaete, Solano Sarmanho. Influência dos distúrbios elétricos em média tensão na qualidade de energia – estudo em um ambiente universitário. 2005. 374 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

[18]OLIVEIRA, Renato Antônio, QUITO, Tercius Murilo. Projeto e análise de um filtro passivo de correntes harmônicas para um computador de uso pessoal. Brasília: UnB, 2005.

[19] Tao,Gang, Adaptive Control Design and Analysis, John wiley & sons, New York, 2003.

[20] Multiple Harmonics Control for Three-Phase Grid Converter Systems With the Use of PI-RES Current Controller in a Rotating Frame, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 21, No. 3, May 2006.

[21] GOMES, A. T. Telecomunicações : transmissão, recepção, AM-FM sistemas pulsados. 2. ed. São Paulo: Livros Erica, 1985. 457p.

[22] M. Aredes, E. H. Watanabe, New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters, IEEE Trans. Power Delivery, vol 10, no. 3, July 1995, pp. 1649-1656.

[23] Luís Fernando Corrêa Monteiro. Algumas contribuições para o controle de filtros ativos. 2003. 94 f. COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003.