



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Campus de Bauru

**CRISTIANO JOSÉ NICOLAU ARBEX**

**APLICAÇÃO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA  
PARA COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS DE CORRENTE**

**Orientador: Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão**

**BAURU – SP**

**2011**



Universidade Estadual Paulista  
"Júlio de Mesquita Filho"  
Campus de Bauru

**CRISTIANO JOSÉ NICOLAU ARBEX**

# **APLICAÇÃO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS DE CORRENTE**

Dissertação apresentada junto à Faculdade de Engenharia de Bauru da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, sob orientação do Prof. Dr. Fernando Pinhabel Marafão.

**BAURU – SP**

**2011**

Arbex, Cristiano José Nicolau.

Aplicação da teoria de potência conservativa para  
compensação de distúrbios de corrente / Cristiano José  
Nicolau Arbex, 2011

87 f.

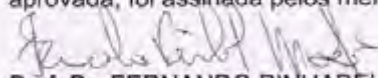
Orientador: Fernando Pinhabel Marafão

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011

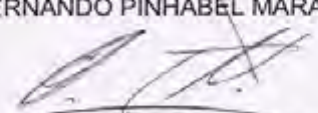
1. Teoria de Potência Conservativa. 2. Filtros  
Ativos de Potência. 3. Compensação Seletiva. 4.  
Distúrbios de Corrente. I. Universidade Estadual  
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Cristiano José Nicolau Arbex, discente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do(a) Faculdade de Engenharia de Bauru.**

Aos 19 dias do mês de agosto do ano de 2011, às 16:00 horas, no(a) ANFITEATRO DO STI DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO do(a) Departamento de Engenharia de Controle e Automação / Faculdade de Engenharia de Sorocaba - UNESP, Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do ABC - UFABC, Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE Mestrado de Cristiano José Nicolau Arbex, intitulado "APLICAÇÃO DA TEORIA DE POTÊNCIA CONSERVATIVA PARA COMPENSAÇÃO DE DISTÚRBIOS DE CORRENTE". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO



Prof. Dr. CLAUDIONOR FRANCISCO DO NASCIMENTO



Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI

# Resumo

Este trabalho apresenta um estudo de aplicação da Teoria de Potência Conservativa (CPT) na geração da referência para um filtro ativo de potência paralelo (FAP), a fim de promover a compensação de distúrbios de corrente em um sistema elétrico trifásico a três fios. Apresenta, também, um resumo de algumas das principais teorias de potência utilizadas na análise de sistemas elétricos com formas de onda não senoidais e desequilibradas, especialmente aquelas úteis para o controle de filtros ativos. Atenção especial foi dada para a teoria CPT que, além de ser uma proposta recente, permite selecionar o distúrbio a ser compensado pelo filtro ativo paralelo, bastando definir sua referência a partir das parcelas de corrente da CPT. Neste trabalho também foi proposta uma metodologia de projeto para filtros ativos paralelo, a qual é baseada na análise da carga através da CPT e em função da compensação seletiva de distúrbios. Dessa forma é possível estudar a viabilidade econômica de um dado filtro ativo paralelo escolhendo a parcela de corrente mais adequada a ser compensada, obviamente, dentro de uma determinada configuração de carga. Outro ponto destacado no trabalho foi a introdução de uma nova definição de fator de potência, proposta pela CPT e que, além de reativos, também considera os efeitos dos desequilíbrios e das distorções no sistema elétrico. Com base nesta nova definição, percebe-se a necessidade de uma revisão dos valores de referência definidos pelas normas atuais para o fator de potência. A validação dos estudos e do uso da CPT no controle do filtro ativo paralelo foi feita através de simulações computacionais no software PSIM.

# Abstract

This work presents an application study of the Conservative Power Theory (CPT) in the generation of control reference for a Parallel Active Power Filter (PAF), in order to compensate current disturbances in a three-phase three-wire electrical power system. Some of the most important power theories found in literature have also been summarized, especially those related to active filter controlling techniques. Special attention was given for the CPT, since it is a recent proposal and it allows the selection of the disturbance to be compensated through the definition of different control references using different CPT current parcels. An alternative methodology has also been proposed to the design of the parallel active power filter, which is based on the analysis of the load by means of the CPT current decomposition and according to a previously defined selective compensating strategy. Therefore, it is possible to analyze the economic viability of the active power filter implementation if choosing the most important disturbance to be compensated, obviously assuming a specific load configuration. Other important contribution was the discussion of a new power factor definition (proposed by the CPT), which considers not only the load reactive behavior, but also the effects of current unbalances and distortions on the efficiency of the power circuit. Based on this new definition, we observe the necessity of revising the normalized referential values in order to ensure a proper accountability or revenue metering methodology. Finally, the theoretical studies and the CPT application for controlling a parallel active filter were validated by means of computational simulations using PSIM software.

# Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus, pela vida.

Ao professor Dr. Fernando Pinhabel Marafão, pela paciência e pela dedicação na orientação desta dissertação.

Aos meus pais José e Clélia, pelo carinho e dedicação em todos estes anos.

A minha esposa Aline, pelo incentivo, paciência, amor e dedicação nestes anos.

Ao meu querido “vô” Armando (*in memoriam*), que muito me ensinou e incentivou.

A Faculdade de Engenharia de Bauru, pela oportunidade de desenvolver este trabalho.

# Dedicatória

À minha querida esposa Aline e ao nosso bebê Thomas, com muito amor.

# Sumário

<b>Resumo</b> .....	<b>v</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>vi</b>
<b>Agradecimentos</b> .....	<b>vii</b>
<b>Dedicatória</b> .....	<b>viii</b>
<b>Lista de Símbolos, Siglas e Definições</b> .....	<b>xii</b>
<b>Capítulo I</b> .....	<b>1</b>
<b>Introdução Geral</b> .....	<b>1</b>
1.1 – Motivação.....	2
1.2 – Organização do Trabalho.....	4
<b>Capítulo II</b> .....	<b>5</b>
<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>5</b>
2.1 Filtros Ativos de Potência .....	5
2.2 Topologias de Filtros Ativos Paralelos Trifásicos.....	7
2.2.1 Filtro Trifásico a Três Fios.....	8
2.2.2 Filtro Trifásico a Quatro Fios .....	8
2.2.3 Capacitor Dividido .....	10
2.2.4 Conversor de Quatro Braços .....	11
2.3 Estratégias de controle do Filtro Ativo.....	11
2.3.1 Controle da Tensão do Barramento CC.....	11
2.3.2 Controle da corrente do filtro ativo paralelo .....	13
2.4 Técnicas de Geração de Referência para o Filtro Ativo Paralelo .....	16
2.4.1 Síntese de corrente senoidal.....	16
2.4.2 Síntese de carga resistiva .....	16
2.5 Teorias de Potência Elétrica .....	17

2.5.1 Proposta de Fryze.....	17
2.5.2 Proposta de Akagi et al.....	18
2.5.3 Proposta de Depenbrock.....	21
2.5.4 Proposta de Tenti et al. ....	24
<b>Capítulo III.....</b>	<b>25</b>
<b>Teoria de Potência Conservativa - CPT.....</b>	<b>25</b>
3.1 Definições Básicas .....	25
3.1.1 Potência Ativa Instantânea .....	25
3.1.2 Energia Reativa Instantânea.....	26
3.1.3 Potência Ativa.....	26
3.1.4 Energia Reativa .....	26
3.2 Decomposição das correntes de fase.....	27
3.2.1 Corrente Ativa Balanceada .....	27
3.2.2 Corrente Reativa Balanceada .....	27
3.2.3 Corrente Ativa Desbalanceada .....	28
3.2.4 Corrente Reativa Desbalanceada .....	28
3.2.5 Corrente de Desequilíbrio .....	28
3.2.6 Corrente Residual .....	29
3.3 Fator de Potência: um novo conceito .....	29
3.3.1 Potência Aparente.....	29
3.3.2 Potência Complexa.....	30
3.3.3 Potência de Desequilíbrio .....	30
3.3.4 Potência de Distorção .....	30
3.3.5 Fator de Potência Global (Trifásico).....	31
<b>Capítulo IV.....</b>	<b>32</b>
<b>Metodologia de Projeto do Filtro Ativo Paralelo.....</b>	<b>32</b>
4.1 Projeto do indutor de saída.....	33
4.2 Projeto do banco de capacitores.....	34
4.3 Especificação do ganho dos transdutores de corrente .....	35
4.3.1 Ganho do transdutor de corrente da carga .....	35
4.3.2 Ganho do transdutor de corrente do filtro .....	35
4.4 Especificação do ganho dos transdutores de tensão .....	35

4.4.1 Ganho do transdutor de tensão da rede.....	36
4.4.2 Ganho do transdutor de tensão do barramento CC .....	36
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>37</b>
<b>Simulações .....</b>	<b>37</b>
5.1 – Primeiro Caso: Carga Resistiva Equilibrada .....	40
5.2 – Segundo Caso: Carga Resistiva Desequilibrada .....	42
5.3 – Terceiro Caso: Carga Resistiva + Indutiva Equilibrada .....	45
5.4 – Quarto Caso: Carga Resistiva + Indutiva Desequilibrada .....	48
5.5 – Quinto Caso: Carga Não Linear Equilibrada .....	53
5.6 – Sexto Caso: Carga Não Linear Desequilibrada.....	58
5.7 – Cálculo dos Elementos do Filtro Ativo Paralelo.....	64
5.7.1 – Cálculo do indutor de saída.....	65
5.7.2 – Cálculo do capacitor do barramento CC.....	66
5.7.3 – Cálculo do ganho do transdutor de corrente da carga .....	66
5.7.4 – Cálculo do ganho do transdutor de corrente do filtro .....	66
5.7.5 – Cálculo do ganho do transdutor de tensão da rede.....	66
5.7.6 – Cálculo do ganho do transdutor de tensão do barramento CC .....	67
5.7.7 – Cálculo dos ganhos dos controladores da malha de tensão .....	67
5.7.8 – Cálculo dos ganhos dos controladores da malha de corrente .....	67
<b>Capítulo VI.....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusão .....</b>	<b>69</b>
Propostas para futuros trabalhos.....	70
<b>Referências Bibliográficas .....</b>	<b>71</b>

# Lista de Símbolos, Siglas e Definições

## Filtros Ativos

Símbolo	Definição	Unidade
$di_{carga_{max}}/dt$	Máxima derivada de corrente na carga	kA/s
$I_{carga_{max}}$	Máxima corrente da carga	A
$I_{na_{max}}$	Máxima corrente não ativa da carga	A
$f_s$	Freqüência de chaveamento dos transistores	Hz
$f_{rede}$	Freqüência da rede elétrica	Hz
$\Delta V_{CC}$	Porcentagem de ondulação da tensão do barramento CC	
$\Delta i_{LF}$	Porcentagem de ondulação da corrente do indutor de saída	
$G_{Ima}(s)$	Função de transferência em malha aberta do controlador da malha de corrente	
$G_{PIc}(s)$	Função de transferência do controlador PI da malha de tensão	
$G_{PIi}(s)$	Função de transferência do controlador PI da malha de corrente	
$G_{Vma}(s)$	Função de transferência em malha aberta do controlador da malha de tensão	
$K_{CC}$	Ganho linearizado do retificador	
$K_{PWM}$	Ganho linearizado do conversor PWM	
$K_{IF}$	Ganho do transdutor de corrente do filtro ativo	
$K_{IL}$	Ganho do transdutor de corrente da carga	
$K_{Ic}$	Ganho integral do controlador PI da malha de tensão	
$K_{ii}$	Ganho integral do controlador PI da malha de corrente	
$K_{VCC}$	Ganho do transdutor de tensão do barramento CC	
$K_{VCA}$	Ganho do transdutor de tensão da rede elétrica	
$K_{Pcc}$	Ganho proporcional do controlador PI da malha de tensão	
$K_{Pi}$	Ganho proporcional do controlador PI da malha de corrente	
$C_F$	Capacitância do barramento CC	F
$L_F$	Indutância de saída do filtro ativo paralelo	H
$R_F$	Resistência interna do indutor de saída do filtro	$\Omega$
$T_a$	Período de amostragem	s
$V_{CC}$	Tensão no barramento CC	V
$V_{rede_{ef}}$	Valor eficaz da tensão de fase da rede elétrica	V
$Z_{linha}$	Impedância de linha	$\Omega$

$m_f$	Margem de fase	°
$\omega_{CC}$	Freqüência natural do sistema em malha aberta com o controlador PI	Rad/s
$\omega_{SC}$	Freqüência natural do sistema em malha aberta sem o controlador PI	Rad/s

### Teoria CPT

Símbolo	Definição	Unidade
A	Potência Aparente da carga	VA
P	Potência Ativa da carga	W
N	Potência de Desequilíbrio da carga	VA
Q	Potência Reativa da carga	VA
V	Potência de Distorção da carga	VA
$\mu$	Índice que designa uma determinada fase	
$\mathbf{v}$	Vetor das tensões de fase do circuito	V
$\hat{\mathbf{v}}$	Vetor das integrais imparciais ( <i>unbiased</i> ) das tensões de fase do circuito	V
$\mathbf{i}$	Vetor das correntes de fase do circuito	A
$p$	Potência ativa instantânea	W
$w$	Energia reativa instantânea	J
$P$	Potência Ativa Média	W
$W$	Energia Reativa Média	J
$U$	Tensão eficaz do sistema operando em regime senoidal	V
$I$	Corrente eficaz do sistema operando em regime senoidal	A
$\varphi$	Ângulo de fase do sistema operando em regime senoidal	°
$i_{a\mu}^b$	Parcela de corrente ativa balanceada da fase $\mu$ do circuito	A
$i_{r\mu}^b$	Parcela de corrente reativa balanceada da fase $\mu$ do circuito	A
$i_{a\mu}^u$	Parcela de corrente ativa desbalanceada da fase $\mu$ do circuito	A
$i_{r\mu}^u$	Parcela de corrente reativa desbalanceada da fase $\mu$ do circuito	A
$i_{u\mu}$	Parcela de corrente de desequilíbrio da fase $\mu$ do circuito	A
$i_{v\mu}$	Parcela de corrente residual da fase $\mu$ do circuito	A
$G_\mu$	Condutância da fase $\mu$ do circuito	S
$G^b$	Condutância equivalente do circuito	S
$B_\mu$	Reatidade da fase $\mu$ do circuito	S
$B^b$	Reatidade equivalente do circuito	S
$\lambda$	Fator de Potência Global (termo originado da CPT)	

## Grandezas

SÍMBOLO	UNIDADE
A	Ampère
V	Volt
W	Watt
VA	Volt-Ampère
F	Farad
H	Henry
J	Joule
$\Omega$	Ohm
s	Segundo
S	Siemens
Hz	Hertz
Rad/s	Radiano por segundo
kA/s	Quilo Ampère por segundo
°	Grau

## Siglas

Sigla	Descrição
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CPT	Teoria de Potência Conservativa ( <i>Conservative Power Theory</i> )
DLL	Biblioteca de Vínculo Dinâmico ( <i>Dynamic Link Library</i> )
DVR	Restaurador Dinâmico de Tensão ( <i>Dynamic Voltage Restorer</i> )
FAP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	Transistor Bipolar de Porta Isolada ( <i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> )
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PRODIST	Procedimentos de Distribuição
PWM	Modulação por Largura de Pulso ( <i>Pulse Width Modulation</i> )
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	Valor Eficaz ( <i>Root Mean Square</i> )
UPS	Fonte Ininterrupta de Energia ( <i>Uninterruptible Power Supply</i> )
PI	Controlador Proporcional Integral

# Capítulo I

## Introdução Geral

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o estudo do funcionamento de um filtro ativo de potência trifásico, para sistemas com três condutores, com a finalidade de corrigir distúrbios na corrente causados pela presença de cargas não-lineares nas instalações. Para isto, será avaliada a utilização de uma nova teoria de potência, a Teoria da Potência Conservativa (do termo em inglês *Conservative Power Theory - CPT*).

Atualmente, existe uma preocupação mundial com os efeitos das cargas não-lineares na qualidade da energia elétrica, tanto nos setores de geração, quanto de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Isto se deve ao aumento das cargas eletrônicas nas instalações, como mostra o resultado de uma pesquisa feita nos Estados Unidos [1], ilustrado na figura 1.1.

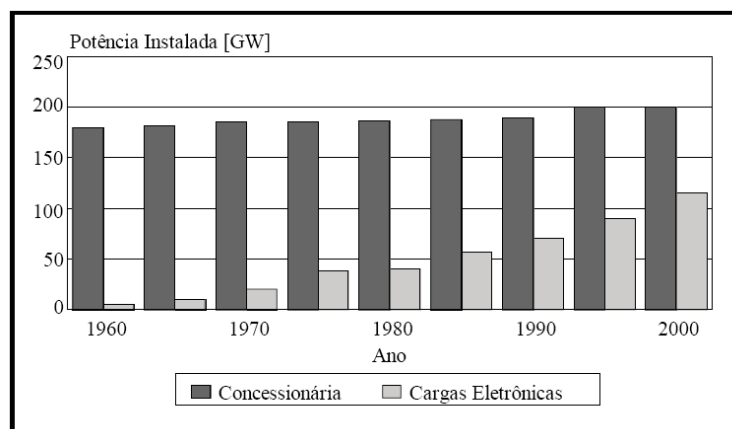


Figura 1.1: Aumento da quantidade de cargas eletrônicas em relação à potência instalada [1].

Nesta linha, foram criadas normas e procedimentos a fim de assegurar que a energia elétrica permaneça dentro de padrões aceitáveis. Dentre elas destacam-se as normas européias (IEC 610003-2) [2] e americanas (IEEE 519) [3]. No Brasil, entretanto, não existe uma norma específica que trate de todos os quesitos necessários para garantir a qualidade da energia elétrica. A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), através dos

Procedimentos de Distribuição (PRODIST), recomenda alguns valores associados principalmente aos distúrbios de tensão (desequilíbrios, distorção harmônica, flutuações, variações de curta duração e variações de frequência) [4], entretanto, pouco é dito ou regulado em termos dos distúrbios de corrente, os quais muitas vezes, são a causa da deterioração da tensão em uma instalação. Neste caso, o que se tem feito é utilizar a IEEE 519 [3] como diretriz para os estudos relacionados com a análise e condicionamento das correntes em instalações industriais.

## 1.1 – Motivação

Há tempos a energia elétrica tem sido o elemento propulsor para o desenvolvimento industrial de uma nação. Mais que isso, a energia elétrica é um bem de consumo do qual todos os seres humanos dependem, seja para sobrevivência, diversão, busca de conhecimento, produção de bens, etc. Assim, o desenvolvimento baseado na energia elétrica faz com que o ser humano se torne dependente deste tipo de natureza energética.

O aumento no consumo, a corrida pelo desenvolvimento e a constante modernização de máquinas e equipamentos fazem com que a energia elétrica venha a sofrer uma série de degradações. As concessionárias de energia são obrigadas, por lei, a garantir certas condições mínimas para o fornecimento de energia elétrica, as quais são medidas por meio dos índices de Qualidade de Energia [5,6]. Entretanto, atualmente, tais índices são convenientes apenas para caracterizar degradações na energia com relação ao número de eventos de interrupção e suas respectivas durações, os quais são denominados na Qualidade da Energia Elétrica, de Distúrbios de Continuidade, pois se referem ao grau de disponibilidade da energia elétrica (se está presente ou não). Existem, porém, outros distúrbios que estão relacionados com a Conformidade da Energia (qualidade da tensão e da corrente elétrica no que se referem a reativos, desequilíbrios e distorções harmônicas) [7,8], os quais não estão explicitamente normalizados nas leis que regem as concessionárias de distribuição. Assim, existe um embate entre os interesses de concessionárias e consumidores.

Devido a esta lacuna na legislação e, também, pelas dificuldades das concessionárias em garantir a qualidade do fornecimento com relação aos distúrbios de conformidade, a comunidade científica vem, há muito tempo, desenvolvendo uma série de soluções eletrônicas para contornar estes problemas. Entre os equipamentos concebidos para estes fins, destacam-se as fontes ininterruptas de energia e os filtros ativos de potência [9-14].

As fontes ininterruptas de energia (também denominadas de UPS – do termo em inglês *Uninterruptible Power Supply*) são concebidas para sustentar o funcionamento de energia para a carga durante eventos de longa duração (minutos ou horas), garantindo a continuidade da energia. Com relação à conformidade das tensões geradas, as características de formas de onda na saída de uma UPS dependem do projeto dos controladores de tensão e corrente empregados e também dos elementos utilizados no armazenamento de energia.

Os filtros ativos de potência são equipamentos eletrônicos instalados entre a rede elétrica e as cargas causadoras de distúrbios (normalmente não-lineares) ou cargas sensíveis a distúrbios, com o objetivo de corrigir algum tipo de anormalidade. Podem ser do tipo Série ou Paralelo.

Os filtros ativos série efetuam a correção na forma de onda da tensão (harmônicos, desequilíbrios e pequenas variações de amplitude) e são ligados em série com a linha de alimentação da carga. Alguns filtros ativos série apresentam maior capacidade de compensação de afundamentos e elevações de tensão, porém necessitam de maior armazenamento de energia (bancos de capacitores, baterias, etc.). São conhecidos também pelo acrônimo DVR (do inglês: *Dynamic Voltage Restorer*). Seu funcionamento consiste em injetar uma tensão que será somada ou subtraída com a tensão do gerador a fim de compensar distúrbios, garantindo tensão de boa qualidade durante eventos de curta duração.

Os filtros ativos paralelos efetuam a correção da forma de onda da corrente e são ligados em paralelo com a linha de alimentação da carga. São equipamentos que trabalham em regime permanente e têm a capacidade de injetar ou drenar correntes do sistema, com a finalidade de compensar distúrbios de correntes harmônicas, reativas e até desequilíbrios de corrente no caso trifásico. Os filtros ativos paralelos serão o objeto de estudo deste trabalho [15,16].

Assim, a principal motivação deste trabalho está na utilização da Teoria de Potência Conservativa para o controle de filtros ativos paralelo. Tal teoria permite a decomposição da corrente elétrica de sistemas operando em condições não senoidais e desequilibrados, em parcelas ortogonais (independentes entre si). Estas parcelas podem ser utilizadas como referência de corrente para o filtro ativo paralelo, proporcionando uma compensação seletiva dos distúrbios de corrente, ou seja, é possível escolher o distúrbio a ser compensado. Por exemplo, pode-se optar em compensar apenas desequilíbrio, apenas harmônicas, apenas reativos, ou simplesmente compensar todos os distúrbios de corrente, bastando para isso alterar a referência do filtro ativo paralelo.

## 1.2 – Organização do Trabalho

O primeiro capítulo da dissertação apresenta uma rápida introdução do tema, destacando suas características principais e a motivação.

O segundo capítulo traz uma revisão da literatura, destacando os principais tipos de filtros ativos e suas características, as topologias utilizadas, os métodos de controle. Neste capítulo ainda são discutidas as principais teorias de potência propostas pela comunidade acadêmica para aplicações em controle de filtros ativos.

O terceiro capítulo trata especificamente da teoria CPT, apresentando os fundamentos matemáticos desta interessante abordagem e, destacando suas características principais.

O quarto capítulo diz respeito ao projeto dos componentes utilizados no filtro ativo paralelo e suas respectivas malhas de controle. Apresenta as principais expressões necessárias ao projeto dos elementos.

No quinto capítulo são apresentados os resultados de simulação obtidos para um filtro ativo paralelo trifásico a três fios. São apresentados seis casos distintos de simulações, cada uma para uma determinada configuração de carga. Ao final do capítulo são mostrados os cálculos dos elementos e das malhas de controle, segundo as expressões apresentadas no capítulo anterior, e utilizando os dados obtidos no início deste capítulo.

No sexto capítulo são apresentadas as conclusões a respeito do trabalho e são propostas sugestões para trabalhos futuros.

# Capítulo II

## Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os principais temas relacionados ao estudo de Filtros Ativos de Potência Paralelos (FAP), destacando os tipos principais e suas características, aplicações, topologias, bem como os respectivos métodos de controle. Também serão discutidas algumas das teorias de potência que vêm sendo propostas pela comunidade internacional e, por fim, uma breve descrição da Teoria de Potência Conservativa e sua importância para a definição das referências para os FAPs.

### 2.1 Filtros Ativos de Potência

Atualmente os Sistemas Elétricos de Potência vem sofrendo forte impacto nos indicadores de Qualidade da Energia Elétrica, tanto em nível nacional quanto em nível mundial, devido à disseminação de cargas não-lineares (reatores eletrônicos, lâmpadas compactas, inversores de frequência, chaves de partida suave, entre outras), as quais além de provocarem distorção na forma de onda da corrente, redução do fator de potência, etc., também são sensíveis a distúrbios de tensão como flutuações ou variações de curta duração. Estes efeitos, presentes na maioria das instalações industriais e até mesmo residenciais, podem gerar uma série de problemas para a indústria, tais como a parada inesperada de máquinas e/ou processos, desligamentos involuntários de sistemas, além de uma série de prejuízos financeiros decorrentes destes eventos.

Em toda instalação elétrica existe o chamado ponto de acoplamento comum (PAC), no qual diversas cargas são conectadas, como mostra a figura 2.1. Em uma instalação ideal, tanto o gerador quanto as cargas não provocam nenhum tipo de distúrbio no sistema. Entretanto, se uma determinada carga em particular for não-linear, ou mesmo uma carga linear acionada por algum dispositivo de controle (por exemplo, um motor de indução acionado por inversor de frequência ou uma resistência acionada através de um gradador), a tensão elétrica no PAC poderá apresentar distorção. Dessa forma, outros consumidores ou até mesmo os equipamentos conectados neste ponto passarão a sofrer as consequências da baixa qualidade da energia.

A principal causa da deformação na tensão da rede é a circulação de correntes distorcidas pelas impedâncias do sistema, sendo tais correntes associadas a existência de cargas não-lineares nas instalações.

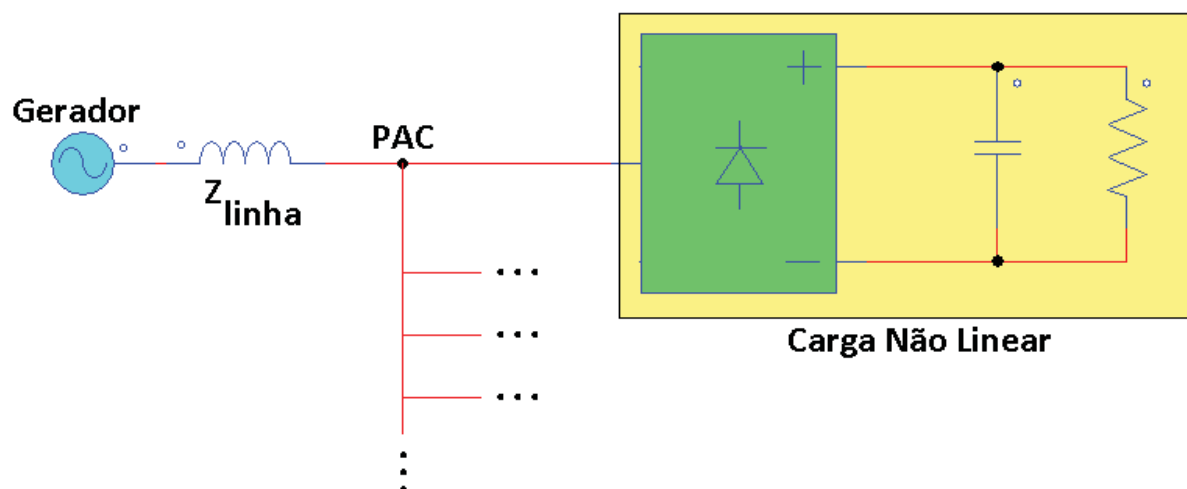


Figura 2.1 – Sistema alimentador de uma instalação elétrica [17].

Os FAPs são equipamentos baseados em elementos de Eletrônica de Potência e dispositivos armazenadores de energia que têm a finalidade de compensar harmônicas, potência reativa e desequilíbrios de carga. A idéia básica consiste em injetar, na linha de alimentação, uma corrente e/ou tensão com mesma amplitude e fase oposta em relação às harmônicas e reativos da corrente da carga, eliminando, assim, o fluxo de corrente harmônica para a fonte e aumentando o fator de potência da carga.

Pelo fato do Filtro Ativo de Potência ser um equipamento conectado na instalação elétrica entre o gerador de energia e a carga, quando inserido em série com a carga, como ilustrado na figura 2.2, tem-se o chamado filtro ativo série. Este tipo de filtro é utilizado para compensar distúrbios da tensão elétrica.

Entretanto, o filtro ativo pode ser ligado em paralelo com a carga, como mostrado na figura 2.3. Neste caso tem-se um filtro ativo do tipo paralelo, o qual é utilizado para compensar distorções na forma de onda da corrente elétrica.

O filtro ativo paralelo tem a capacidade de injetar ou drenar correntes no sistema, de tal forma que a soma da corrente da carga com a corrente fornecida pelo filtro ativo, seja vista pela fonte como uma corrente isenta de distúrbios.

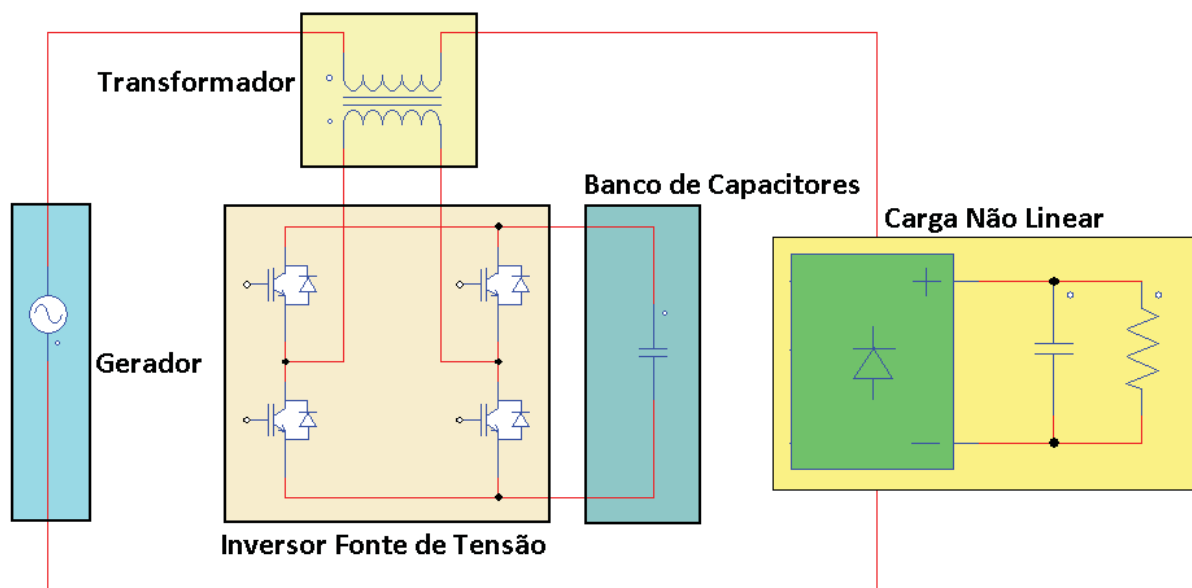


Figura 2.2 – Filtro Ativo de Potência do tipo Série [17].

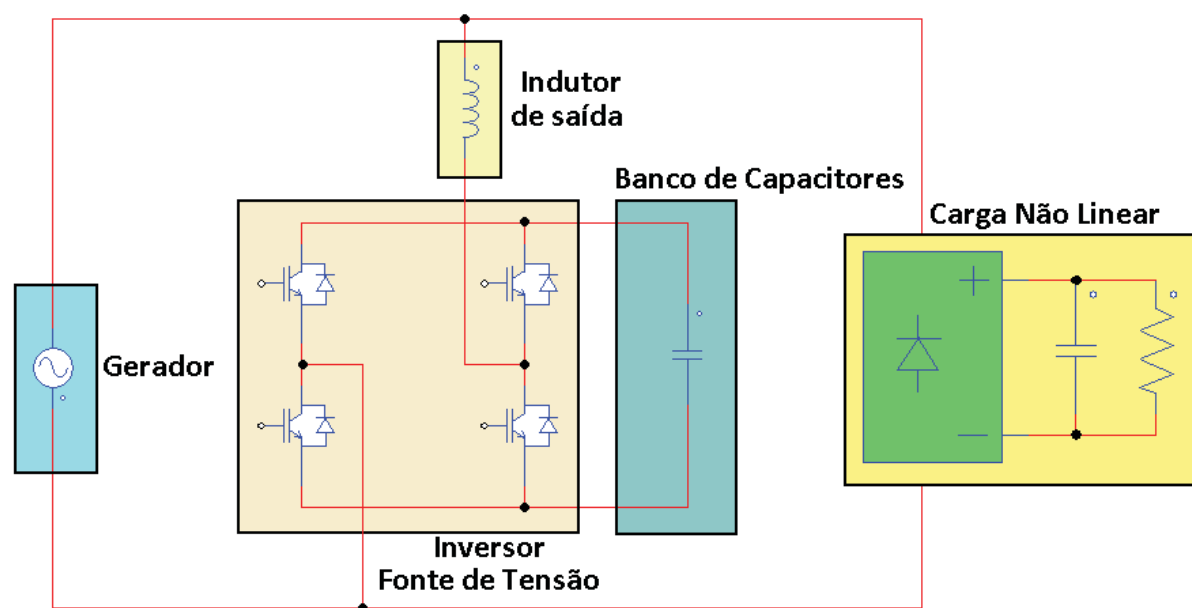


Figura 2.3: Filtro Ativo de Potência do tipo Paralelo [17].

## 2.2 Topologias de Filtros Ativos Paralelos Trifásicos

Um filtro ativo apresenta as seguintes partes principais: barramento de tensão contínua (Barramento CC ou *Link DC*), indutor de saída, inversor e controlador. Para que as tensões e correntes possam ser medidas, e posteriormente processadas, são utilizados sensores de tensão e corrente. É importante ressaltar que estes sensores devem possuir uma resposta muito boa, a fim de garantir o perfeito funcionamento do filtro ativo.

O barramento CC é constituído por um banco de capacitores. Sua tensão deve ser controlada de modo a manter a porcentagem de ondulação dentro das especificações do projeto.

Usualmente, a topologia do inversor é geralmente composta por chaves IGBTs (cuja tradução para o termo original em inglês – *Insulated Gate Bipolar Transistor* – é transistor bipolar de porta isolada) montados em uma configuração denominada de Ponte H, a qual é acionada através de um circuito de comando (*driver*) por meio dos sinais gerados pela etapa de controle. A configuração em Ponte H permite a geração de um sinal PWM (do inglês *Pulse Width Modulation* – Modulação por Largura de Pulso) como dois níveis (+Vcc e -Vcc) ou mesmo três níveis (+Vcc, 0, -Vcc). Muita atenção deve ser tomada nesta etapa com o chamado *dead time* (tempo morto) a fim de garantir que nunca sejam acionados simultaneamente dois IGBTs da mesma coluna (pois isto poderia causar um curto-circuito no barramento CC, destruindo as chaves). A função do inversor é sintetizar uma corrente na saída de maneira que siga uma determinada referência, que está relacionada com a componente da corrente que se deseja compensar. A capacidade de síntese está limitada, em termos de frequência, a aproximadamente 1/10 da frequência de comutação dos transistores [18]. O indutor de saída do filtro ativo tem a finalidade de atuar como um filtro passa baixas, impedindo que sinais de alta frequência, resultantes do chaveamento dos transistores, penetrem na rede elétrica.

Os filtros ativos paralelos trifásicos podem apresentar as seguintes topologias: Três ou Quatro fios, Capacitor Dividido (*Split Capacitor*) e Conversor de Quatro Braços. A seguir será abordada cada uma destas topologias.

### 2.2.1 Filtro Trifásico a Três Fios

Neste tipo de topologia, é utilizada uma ponte H completa contendo seis chaves IGBT. A figura 2.4 ilustra o diagrama de blocos desta topologia. Neste caso as tensões são sempre medidas em relação a uma referência virtual, que consiste em três resistores de valor elevado ligados em estrela.

### 2.2.2 Filtro Trifásico a Quatro Fios

Nesta topologia de filtro ativo são utilizadas três pontes H monofásicas, sendo uma para cada fase e montadas em relação ao condutor retorno. A figura 2.5 ilustra o diagrama de blocos para esta configuração. As tensões de referência podem ser medidas tanto em relação ao condutor neutro quanto em relação a uma referência virtual.

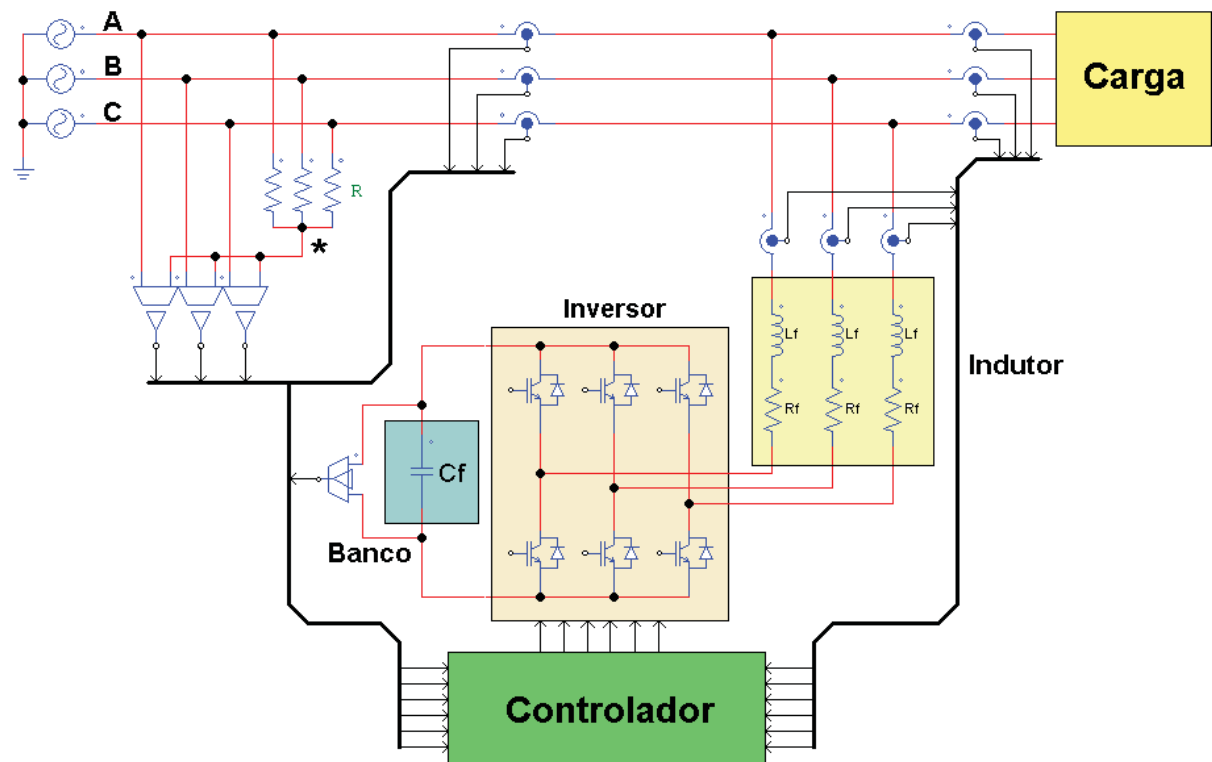


Figura 2.4: Diagrama de blocos de um filtro ativo paralelo trifásico a três fios [17].

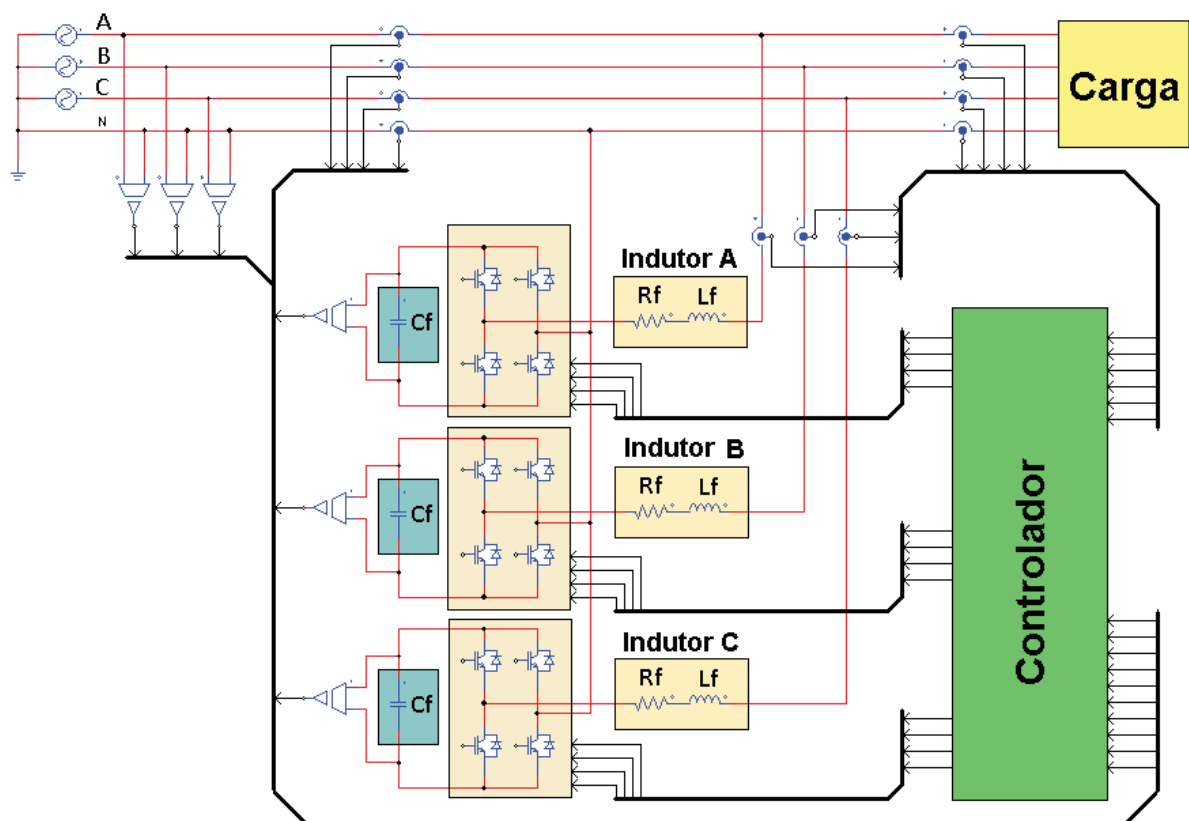


Figura 2.5: Diagrama de blocos de um filtro ativo paralelo trifásico a quatro fios [17].

As linhas em vermelho nos diagramas representam as conexões do circuito de potência, enquanto que as linhas em preto representam conexões do circuito de controle do filtro ativo, como leitura dos sensores e acionamento das chaves semicondutoras.

### 2.2.3 Capacitor Dividido

Esta topologia de filtro ativo utiliza dois capacitores em série para a composição do barramento CC. O centro dos capacitores está ligado ao condutor de retorno e sua principal aplicação está no fato de possuir um número reduzido de chaves (transistores) e permitir o controle de cada braço independentemente, simplificando o controle da corrente. A figura 2.6 ilustra esta topologia.

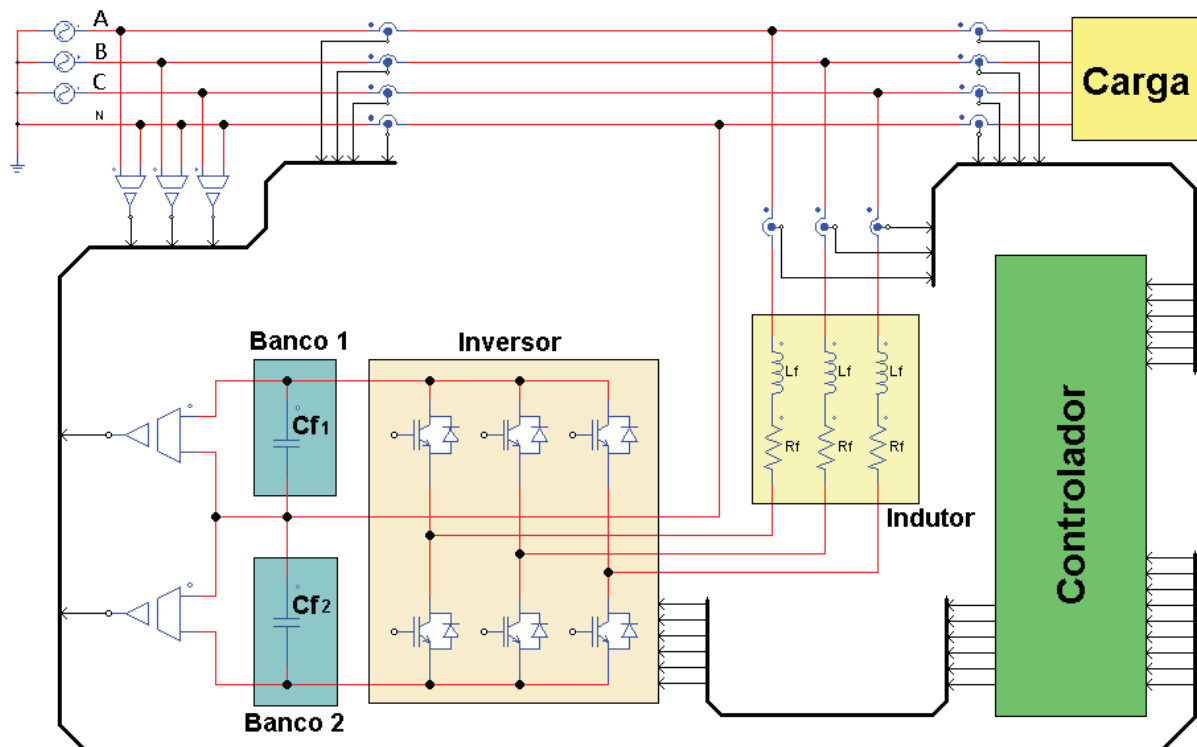


Figura 2.6: Topologia de *Capacitor Dividido* [19].

Entretanto, esta configuração apresenta algumas deficiências. Todas as componentes de seqüência zero injetadas irão fluir através dos capacitores do barramento CC. Esta corrente provocará desbalanceamento na tensão presente nos capacitores. Além disso, nas situações onde for necessário compensar a corrente do neutro, a corrente injetada pelo filtro neste condutor será constituída de componentes CC e CA. Estas componentes CC irão causar um desbalanceamento progressivo na tensão de cada capacitor do barramento CC, podendo provocar uma deficiência de funcionamento do sistema [19].

## 2.2.4 Conversor de Quatro Braços

Trata-se de um inversor fonte de tensão constituído por oito transistores IGBT. Três braços são utilizados para compensar distúrbios nas fases e o quarto braço é ligado ao neutro e tem a finalidade de compensar qualquer componente de corrente presente neste condutor. A figura 2.7 ilustra esta topologia.

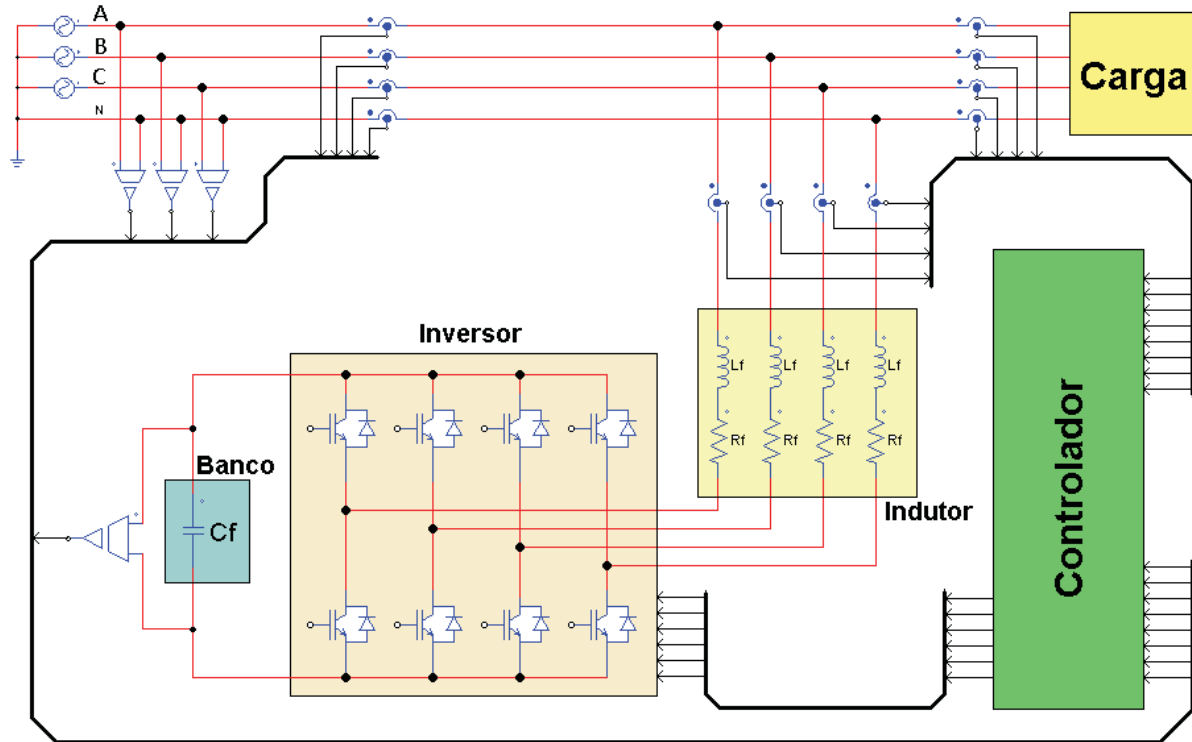


Figura 2.7: Conversor a Quatro Braços [20]

## 2.3 Estratégias de controle do Filtro Ativo

A etapa de controle deve ser constituída de forma a manter constante a tensão no barramento CC, por meio do controle da corrente de carga dos capacitores, e gerar as correntes de compensação do filtro. No primeiro caso, o inversor irá funcionar como um retificador controlado e, no segundo caso, como uma fonte de corrente controlada. Portanto, fazem-se necessárias duas malhas de controle: uma responsável pelo controle da tensão e outra responsável pelo controle da corrente.

### 2.3.1 Controle da Tensão do Barramento CC

Para controlar a tensão no barramento CC, o conversor deve operar como um retificador controlado. Na figura 2.8 tem-se uma representação em diagrama de blocos da malha de controle de tensão do barramento CC [18].

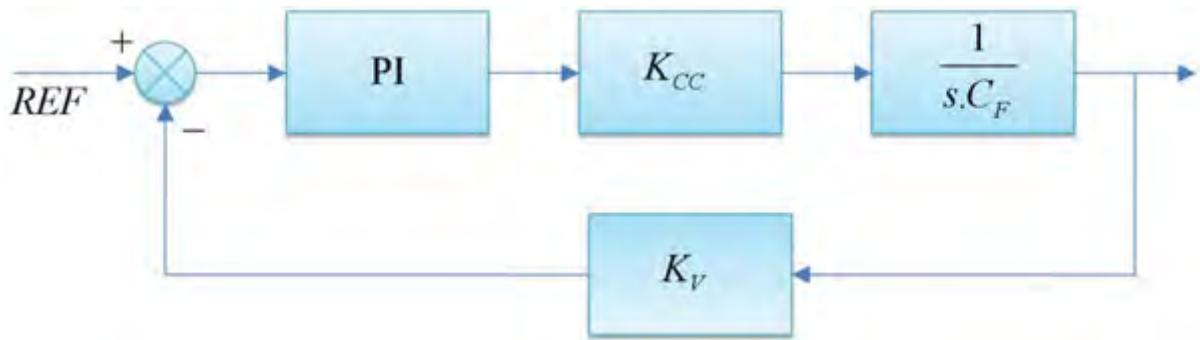


Figura 2.8: Diagrama em blocos da malha de controle da tensão do barramento CC [18].

A referência do controlador é o nível de tensão desejado ao barramento CC e corresponde a uma das especificações de projeto. Esse valor é comparado com a tensão real do barramento, informada pelo transdutor de tensão correspondente, e a diferença entre os valores é utilizada pelo controlador no acionamento do inversor. Uma vez acionado, o conversor irá provocar uma corrente no banco de capacitor que, ao ser integrada no tempo, irá gerar a tensão no barramento CC. Para garantir uma boa dinâmica de funcionamento como fonte de corrente, é importante que a tensão no barramento cc seja pelo menos 30% maior que a tensão máxima de fase (valor de pico) [18,21].

No caso de um filtro trifásico, o valor do ganho do retificador  $K_{CC}$  é dado pela expressão (2.1) [22].

$$K_{CC} = 3 \cdot \frac{(V_{rede\_ef})^2}{V_{CC}} \quad (2.1)$$

Onde:  $V_{rede\_ef}$  é a tensão eficaz de fase no ponto de acoplamento comum e  $V_{CC}$  é a tensão no barramento CC.

Para o controle da malha de tensão será utilizado um controlador do tipo PI (Proporcional Integral), cuja função de transferência é dada por meio da expressão (2.2) [18,22].

$$G_{PIcc}(s) = K_{Pcc} + \frac{K_{Icc}}{s} = \frac{K_{Pcc} \cdot s + K_{Icc}}{s} \quad (2.2)$$

Onde:  $K_{Pcc}$  é o ganho proporcional do controlador da malha de tensão CC e  $K_{Icc}$  é o ganho integral do controlador.

A função de transferência em malha aberta da malha de controle da tensão no barramento CC é dada pela expressão (2.3) [22].

$$G_{Vma}(s) = G_{PIcc}(s) \cdot K_{CC} \cdot \frac{1}{s \cdot C_F} \cdot K_{VCC} = G_{PIcc}(s) \cdot \frac{\omega_{SC}}{s} = \frac{\omega_{CC}}{s} \quad (2.3)$$

Onde:  $G_{PI_{CC}}(s)$  é a função de transferência do controlador PI da malha de tensão;  $C_F$  é a capacitância do barramento CC;  $K_{V_{CC}}$  é o ganho do transdutor de tensão do barramento CC;  $\omega_{SC}$  é a frequência natural do sistema em malha aberta sem o controlador PI e  $\omega_{CC}$  é a frequência natural do sistema em malha aberta com o controlador PI.

Pode-se escrever a partir da equação (2.3), que:

$$\omega_{SC} = \frac{K_{CC} \cdot K_{V_{CC}}}{C_F} \quad (2.4)$$

De acordo com [22], os parâmetros do controlador PI poderão ser obtidos por meio das expressões (2.5) e (2.6).

$$K_{P_{CC}} = \frac{\omega_{CC}}{\omega_{SC}} \quad (2.5)$$

$$K_{I_{CC}} = \frac{K_{P_{CC}} \cdot \omega_{CC}}{\tan(m_f)} \cdot T_a \quad (2.6)$$

Onde:  $\omega_{CC}$  é a frequência natural (rad/s);  $m_f$  é a margem de fase (graus),  $T_a$  é o período de chaveamento dos transistores (s).

### 2.3.2 Controle da corrente do filtro ativo paralelo

Para controlar a malha de corrente do filtro ativo paralelo, podem ser utilizadas duas estratégias: (a) monitorando a corrente da carga e a corrente do filtro ativo, como mostra a figura 2.9 e (b) monitorando apenas a corrente da rede, como mostra a figura 2.10. Na primeira estratégia são necessários dois sensores de corrente, permitindo um controle mais refinado das correntes e, inclusive, permite realizar proteção contra curto-circuito. Já a segunda estratégia requer um sensor apenas, porém não permite realizar a proteção contra curto-circuito [18,21].

Objetivando um maior controle sobre o filtro ativo e, tendo em vista a aplicação da teoria CPT, optou-se pela estratégia de monitoramento da corrente do filtro e da carga. Neste caso, o diagrama de blocos do sistema de controle está mostrado na figura 2.11.

O sinal de referência da malha de controle da corrente é quem irá determinar o tipo de compensação a ser efetuada pelo filtro ativo de potência, sendo assim, a peça fundamental para o funcionamento do filtro ativo. Portanto, na seção seguinte serão discutidas as principais técnicas de geração de referência para o filtro ativo, baseadas nas teorias de potência.

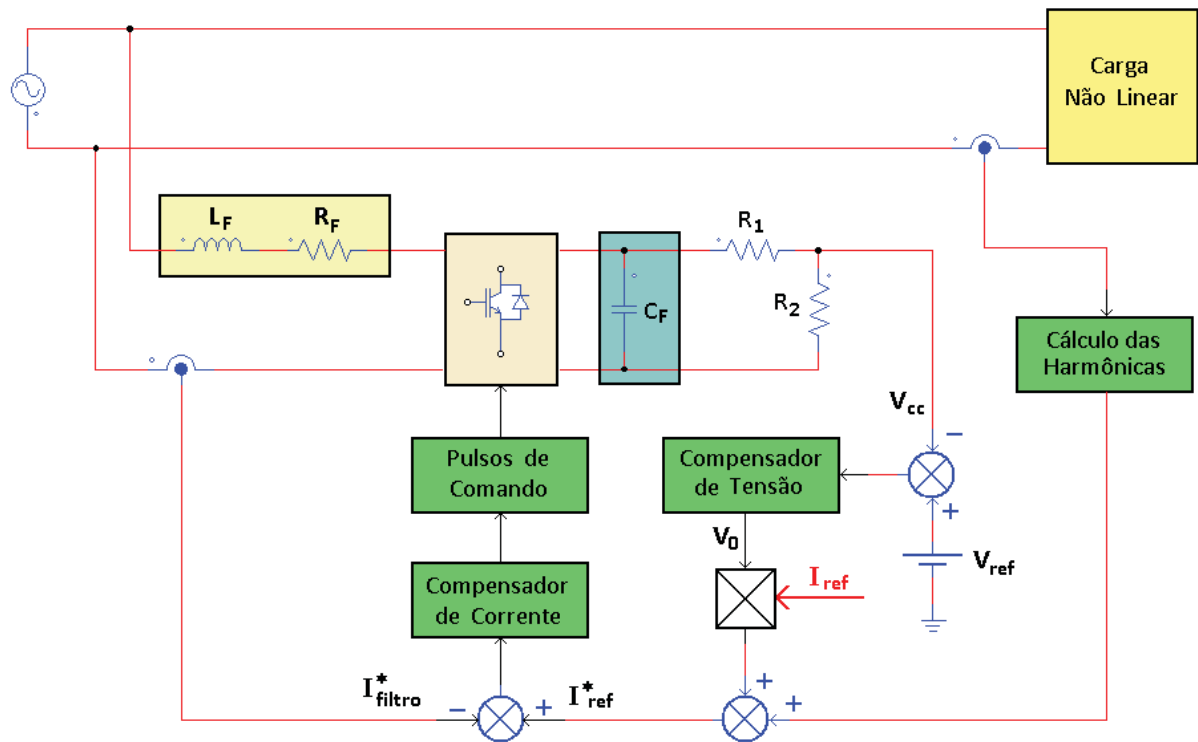


Figura 2.9: Estratégia de controle por monitoração das correntes do filtro e da carga [18].

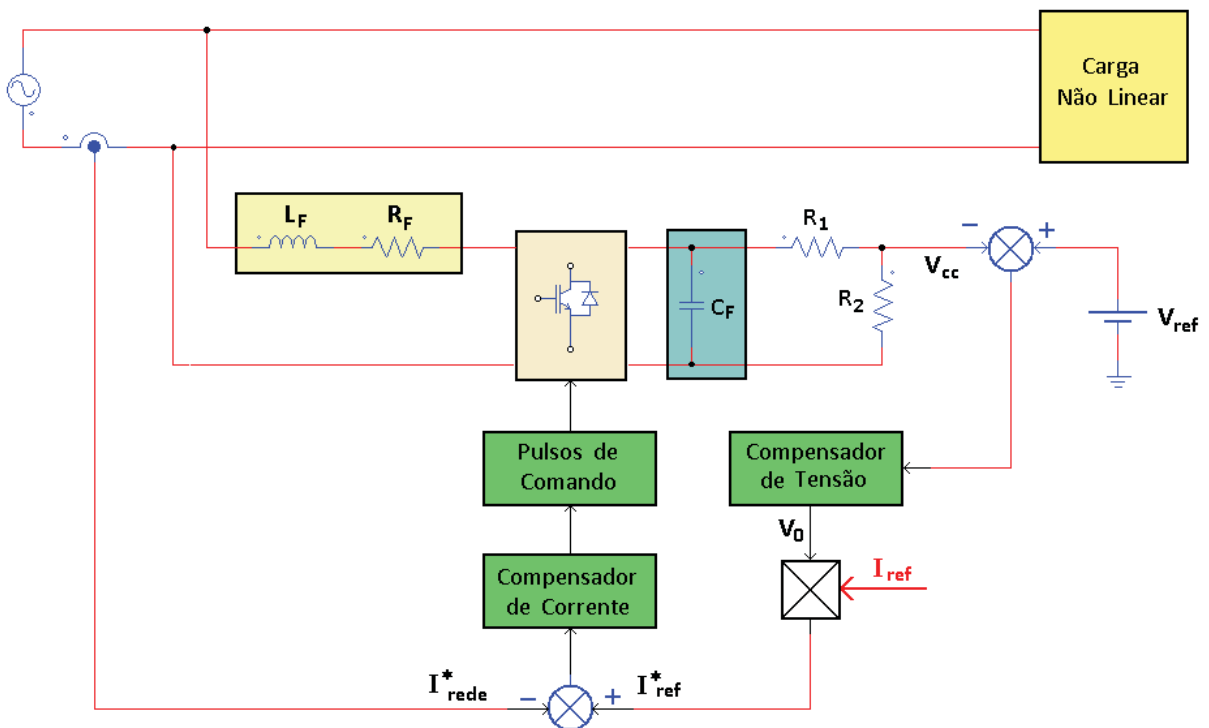


Figura 2.10: Estratégia de controle por monitoração da corrente rede [18].

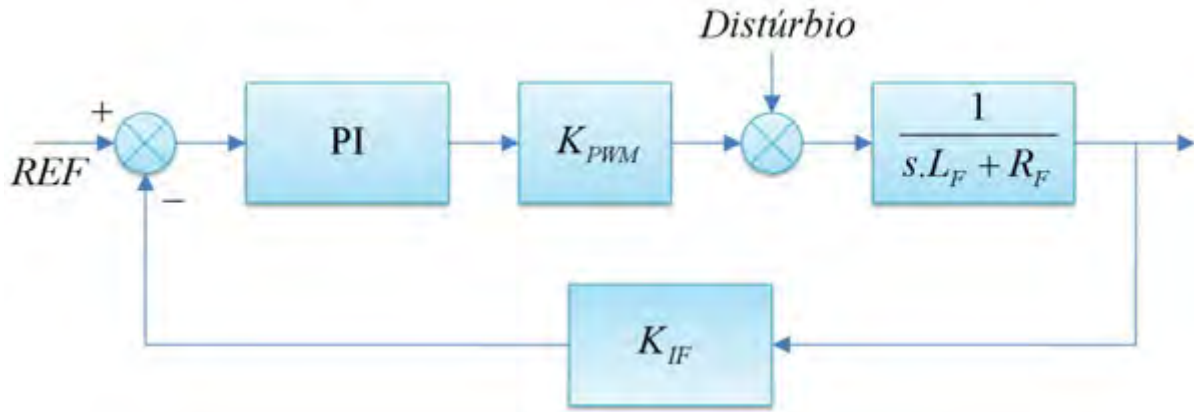


Figura 2.11: Diagrama de blocos do sistema de controle baseado na estratégia de monitoração das correntes do filtro e da carga [18].

No diagrama, a corrente de saída do filtro é comparada com a corrente de referência e o erro gerado é utilizado pelo controlador para determinar o acionamento do inversor. A tensão aplicada pelo inversor é integrada, gerando a corrente de saída do filtro, fechando, assim, a malha de controle.

O ganho do conversor PWM, composto pelo inversor e o respectivo comando, é definido levando-se em conta a faixa de tensão de saída e a respectiva tensão de controle. Assim, considerando uma saturação no valor  $\pm 1$ , tem-se a expressão (2.7).

$$K_{PWM} = \frac{V_{outMAX} - V_{outMIN}}{V_{contMAX} - V_{contMIN}} = \frac{V_{cc} - (-V_{cc})}{1 - (-1)} = V_{cc} \quad (2.7)$$

Novamente, para o controle da malha de controle, será utilizado um controlador do tipo PI cuja função de transferência é dada por (2.8) [23].

$$G_{PIi}(s) = K_{Pi} + \frac{K_{Ii}}{s} = \frac{K_{Pi} \cdot s + K_{Ii}}{s} \quad (2.8)$$

Onde:  $K_{Pi}$  é o ganho proporcional do controlador da malha de corrente CC e  $K_{Ii}$  é o ganho integral do controlador.

Pelo digrama de blocos da figura anterior é possível escrever que a função de transferência do sistema em malha aberta é dada pela expressão (2.9).

$$G_{Ima}(s) = G_{PIi}(s) \cdot K_{PWM} \cdot \left( \frac{1}{s \cdot L_F + R_F} \right) \cdot K_{IF} \quad (2.9)$$

Onde:  $G_{PIi}(s)$  é o ganho do controlador PI da malha de corrente,  $K_{PWM}$  é o ganho do conversor PWM,  $L_F$  é a indutância do indutor de saída do filtro ativo paralelo,  $R_F$  é a resistência ôhmica do condutor usado no indutor e  $K_{IF}$  é o ganho do transdutor de corrente do filtro.

A função de transferência em malha fechada é dada por (2.10).

$$G_{Imf}(s) = K_{IF} \cdot \frac{G_{PIi}(s) \cdot K_{PWM} \cdot \left(\frac{1}{s \cdot L_F + R_F}\right)}{1 + G_{PIi}(s) \cdot K_{PWM} \cdot \left(\frac{1}{s \cdot L_F + R_F}\right) \cdot K_{IF}} \quad (2.10)$$

## 2.4 Técnicas de Geração de Referência para o Filtro Ativo Paralelo

A referência do filtro ativo paralelo é quem determina o tipo de compensação a ser efetuada. Um filtro ativo pode compensar harmônicas de corrente, reativos, desequilíbrios ou combinações destas. Neste sentido, muitas possibilidades tem sido abordadas na literatura [24-30] e dentre as várias opções, algumas se destacam, como por exemplo:

### 2.4.1 Síntese de corrente senoidal

Consiste em escolher uma referência apropriada de tal forma que a corrente injetada pelo filtro ativo anule as distorções de corrente geradas por uma carga não linear. Neste caso, mesmo que as tensões do sistema não sejam senoidais e equilibradas o filtro ativo é capaz de compensar as distorções de corrente, fazendo com que a corrente no lado do gerador apresente forma de onda senoidal [11,28].

### 2.4.2 Síntese de carga resistiva

Consiste em impor que a corrente de referência do filtro ativo siga a forma de onda da tensão. Com isso o comportamento visto pela fonte será o de uma carga resistiva (tensão e corrente estarão em fase). A amplitude da corrente depende do balanço de potência e é ajustada até que a potência ativa absorvida da rede seja exatamente aquela consumida pela carga. Enquanto este equilíbrio não acontece, a diferença instantânea é fornecida ou absorvida ou fornecida pelo capacitor do barramento CC [30]. No caso das tensões apresentarem distorção, a corrente acompanhará a forma de onda da tensão, mas não terá a forma senoidal.

Outras estratégias de compensação são formuladas através das chamadas teorias de potência (instantânea) e as parcelas de corrente a serem compensadas dependem da teoria de potência considerada. É por esta razão que, na seção seguinte, são discutidas algumas das principais teorias e suas características de decomposição das correntes.

Diante do exposto, percebe-se que existem muitas formas de se realizar a compensação. É importante lembrar que o custo do filtro ativo está relacionado com a corrente que o mesmo deve injetar na linha. Assim, dependendo da teoria de potência utilizada é possível conseguir a compensação de um fenômeno específico. Por isso a teoria de potência é muito importante nesta fase. Neste trabalho, optou-se por aplicar a Teoria de Potência Conservativa na decomposição das correntes, pois cada parcela de corrente está relacionada com um fenômeno, por exemplo, potência reativa, distorção e desequilíbrio. Assim, é possível estabelecer uma compensação seletiva dos distúrbios otimizando a capacidade de manipulação de corrente do filtro ativo.

## 2.5 Teorias de Potência Elétrica

Quando um sistema elétrico equilibrado, alimentando cargas lineares, está submetido a regime senoidal, as expressões para a potência ativa e para a potência reativa estão muito bem desenvolvidas.

Entretanto, quando um sistema elétrico está desequilibrado e, além disso, alimenta cargas de natureza não-linear, a teoria convencional não é suficiente para exprimir os efeitos que ocorrem no sistema devido às condições de desequilíbrios e, também, às distorções existentes na forma de onda.

Dessa forma, nas últimas décadas, várias teorias foram propostas com a finalidade de expressar o cálculo da potência nos sistemas elétricos operando sob condições não-senoidais. Muitas delas tentam associar as parcelas de potência a determinados fenômenos físicos. Dentre as muitas propostas, as descritas a seguir são definidas no domínio do tempo e têm sido utilizadas para o controle de filtros ativos de potência.

### 2.5.1 Proposta de Fryze

Trata-se de uma proposta no domínio do tempo, cujo equacionamento utiliza variáveis unidimensionais instantâneas e periódicas de tensão e corrente ( $v$  e  $i$ ). Propõe uma decomposição da corrente total  $i$  em duas componentes: ativa ( $i_w$ ) e reativa ( $i_b$ ) [31].

A parcela ativa, ou seja, aquela que efetivamente transfere potência para a carga e que apresenta a mesma forma de onda da tensão, pode ser determinada pela expressão (2.11).

$$i_w = \left( \frac{P_w}{V^2} \right) \cdot v = G_e \cdot v \quad (2.11)$$

O termo  $P_w$  representa a potência ativa média e  $V$  é o valor eficaz (RMS) da tensão. A grandeza  $G_e$  é chamada de “condutância equivalente” do sistema.

A parcela reativa, que representa uma corrente adicional no sistema, é determinada através da expressão (2.12).

$$i_b = i - i_w \quad (2.12)$$

No caso de sinais de tensão e corrente periódicos as equações anteriores são válidas independente da forma de onda dos sinais.

Tendo em vista que as componentes de corrente são ortogonais (seu produto escalar é nulo), seus valores eficazes podem ser relacionados através de (2.13).

$$I^2 = I_w^2 + I_b^2 \quad (2.13)$$

A potência aparente terá, então, as seguintes componentes:

$$P_s^2 = P_w^2 + P_b^2 \quad (2.14)$$

A potência ativa  $P_w$  pode ser obtida por meio de (2.15).

$$P_w = V \cdot I_w = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (2.15)$$

A potência reativa de Fryze, também conhecida por potência fictícia ou potência não ativa, é dada por meio da expressão (2.16).

$$P_b = V \cdot I_b \quad (2.16)$$

Como se pode observar, a teoria proposta por Fryze permite a decomposição da corrente total nas parcelas ativa e não-ativa ( $i_b$ ). Utilizando esta parcela não-ativa como referência para um filtro ativo paralelo, pode-se obter a compensação dos distúrbios presentes na corrente, deixando apenas a parcela de corrente ativa, ou seja, com a mesma forma de onda da tensão, o que emula uma carga resistiva. A desvantagem desta teoria é que foi desenvolvida apenas para sistemas monofásicos e, o fato de agrupar todos os distúrbios na parcela não ativa, não permitindo assim, a compensação seletiva dos distúrbios.

## 2.5.2 Proposta de Akagi et al.

Trata-se de uma proposta desenvolvida no domínio do tempo que também ficou conhecida como **Teoria pq**. Está baseada na Transformação de Clarke, que consiste em transformar coordenadas de um sistema trifásico (a, b, c) para um sistema bifásico ( $\alpha, \beta$ ) [32].

Para transpor as coordenadas  $a, b, c$  (defasadas  $120^\circ$ ) para  $\alpha, \beta, 0$  (ortogonais entre si), são usadas as seguintes equações (2.17) e (2.18).

Tensões:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Correntes:

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Pela Teoria pq são definidas, para o sistema trifásico a quatro fios, duas potências reais instantâneas ( $p_0$  e  $p_{\alpha\beta}$ ) e uma potência imaginária instantânea ( $q_{\alpha\beta}$ ), de acordo com a expressão (2.19).

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A componente de seqüência zero da potência real instantânea é aquela que circula por um circuito monofásico de seqüência zero e é expressa por (2.20).

$$p_0 = v_0 \cdot i_0 \quad (2.20)$$

A componente  $\alpha\beta$  da potência real instantânea é aquela que circula por um sistema bifásico formado pelos circuitos  $\alpha$  e  $\beta$  sendo expressa por (2.21).

$$p_{\alpha\beta} = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \quad (2.21)$$

A potência imaginária instantânea foi definida como uma nova grandeza elétrica, sendo formada pela soma dos produtos das tensões de uma fase com as correntes de outra fase, de acordo com a expressão (2.22).

$$q_{\alpha\beta} = v_\beta \cdot i_\alpha - v_\alpha \cdot i_\beta \quad (2.22)$$

No caso de um sistema trifásico a quatro fios, a expressão da potência trifásica instantânea é dada por (2.23).

$$\begin{aligned}
 p_{3\phi} &= v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \\
 p_{3\phi} &= v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0 \\
 p_{3\phi} &= p_{\alpha\beta} + p_0
 \end{aligned} \tag{2.23}$$

Utilizando a matriz inversa de transformação, é possível obter as correntes  $i_0$ ,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  a partir da equação (2.19), como mostrado em (2.24).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_0 \cdot (v_\alpha^2 + v_\beta^2)} \cdot \begin{bmatrix} (v_\alpha^2 + v_\beta^2) & 0 & 0 \\ 0 & v_0 \cdot v_\alpha & -v_0 \cdot v_\beta \\ 0 & v_0 \cdot v_\beta & -v_0 \cdot v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_0 \\ p_{\alpha\beta} \\ q_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

As correntes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  são ortogonais e podem ser decompostas em parcela ativa ( $i_{\alpha p}$  e  $i_{\beta p}$ ) e reativa ( $i_{\alpha q}$  e  $i_{\beta q}$ ), como mostra (2.25).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix} \tag{2.25}$$

As parcelas ativa e reativa podem ser obtidas por meio das expressões (2.26) a (2.29).

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot p_{\alpha\beta} \tag{2.26}$$

$$i_{\alpha q} = \frac{-v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot q_{\alpha\beta} \tag{2.27}$$

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot p_{\alpha\beta} \tag{2.28}$$

$$i_{\beta q} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot q_{\alpha\beta} \tag{2.29}$$

A teoria pq mostra que a parcela de potência imaginária instantânea ( $q_{\alpha\beta}$ ) não participa da transferência de potência do gerador para a carga, mas corresponde a uma interação de energia entre as fases do sistema. Os autores demonstraram que uma vez calculada a contribuição desta potência imaginária por fase, sua soma instantânea resulta nula. Dessa forma é possível construir dispositivos compensadores que utilizam a energia de uma determinada fase para compensar os distúrbios das outras fases, sem a necessidade de elementos armadores de energia.

Utilizando como referência para um filtro ativo paralelo as parcelas de correntes reativas instantâneas, mostradas em (2.27) e (2.29), é possível compensar a potência imaginária, indesejável ao sistema elétrico, confinando-a para o lado da carga.

Por fim, conclui-se que a Teoria pq é bastante útil na compensação de distúrbios, porém não permite uma compensação seletiva, uma vez que os distúrbios envolvidos já foram agrupados nas parcelas  $\alpha$  e  $\beta$ .

### 2.5.3 Proposta de Depenbrock

Trata-se de uma proposta no domínio do tempo que tem por base a teoria apresentada por Fryze. Inclui, ainda, o conceito de valores coletivos ou equivalentes, sugeridos por Buchholz e, por isso, também passou a ser conhecida por Método FBD (Fryze-Buchholz-Depenbrock) [33].

Baseando-se nas Leis de Kirchhoff, são definidas as variáveis coletivas instantâneas de corrente e tensão de acordo com as expressões (2.30) e (2.31).

Corrente:

$$i_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{v=1}^m i_v^2} = \sqrt{\mathbf{i} \cdot \mathbf{i}} \quad (2.30)$$

Tensão:

$$v_{\Sigma 0} = \sqrt{\sum_{v=1}^m v_{v0}^2} = \sqrt{\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{v}_0} \quad (2.31)$$

Nestas expressões, o índice  $m$  indica o número de condutores conectados a um nó do circuito elétrico, independentemente se são fases ou condutores de retorno. O índice 0 da expressão indica que as tensões das fases são medidas em relação a um ponto de referência virtual e não em relação ao condutor de retorno.

Os vetores instantâneos de corrente e tensão, para um determinado ponto do circuito, são determinados, respectivamente, pelas expressões (2.32) e (2.33).

Corrente:

$$\mathbf{i} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Tensão:

$$\mathbf{v}_0 = \begin{bmatrix} v_{a0} \\ v_{b0} \\ \vdots \\ v_{m0} \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

Estes vetores apresentam as seguintes propriedades descritas por (2.34) e (2.35).

$$\sum_{v=1}^m i_v = 0 \quad (2.34)$$

e

$$\sum_{v=1}^m v_{v0} = 0 \quad (2.35)$$

Dessa forma tem-se a potência coletiva instantânea expressa por (2.36).

$$p_\Sigma = \mathbf{v}_o \cdot \mathbf{i} \quad (2.36)$$

Os valores eficazes coletivos quadráticos podem ser determinados como a média do quadrado das grandezas coletivas, de acordo com (2.37) e (2.38).

Corrente:

$$I_\Sigma^2 = \overline{i_\Sigma^2} = \frac{1}{T} \int_0^T i_\Sigma^2(t) \cdot dt = \overline{(\mathbf{i} \cdot \mathbf{i})} \quad (2.37)$$

Tensão:

$$V_{\Sigma 0}^2 = \overline{v_{\Sigma 0}^2} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{\Sigma 0}^2(t) \cdot dt = \overline{(\mathbf{v}_o \cdot \mathbf{v}_o)} \quad (2.38)$$

Todas as definições apresentadas podem ser utilizadas para definir o conceito de Potência Aparente Equivalente ou Coletiva, a qual considera os fenômenos envolvidos com o sistema elétrico, tais como perdas, transferência de energia, oscilações, etc. Esta definição de potência aparente é interessante, também, pois leva em conta as assimetrias presentes nos sistemas polifásicos atuais e a corrente presente no condutor de retorno. É definida por meio da expressão (2.39).

$$S_\Sigma = V_{\Sigma 0} \cdot I_\Sigma \quad (2.39)$$

Pode-se definir a Potência Ativa Coletiva, cujo significado é idêntico ao da potência ativa convencional, através das expressões anteriores, como mostrado em (2.40).

$$P_\Sigma = \overline{p_\Sigma} = \frac{1}{T} \int_0^T p_\Sigma(t) \cdot dt = \overline{(\mathbf{v}_o \cdot \mathbf{i})} \quad (2.40)$$

Dessa forma, o fator de potência pode ser escrito de acordo com (2.41).

$$FP = \frac{P_{\Sigma}}{S_{\Sigma}} \quad (2.41)$$

O autor sugere, ainda, a decomposição das correntes totais em parcelas que sejam proporcionais às respectivas tensões, independente da forma de onda, e responsáveis pela transferência de potência à carga. Estas parcelas de corrente foram denominadas de “**correntes de potência**” (power currents) e podem ser determinadas como mostra (2.42).

$$i_{vp} = \frac{p_{\Sigma}}{v_{\Sigma 0}^2} \cdot v_{v0} = G_p \cdot v_{v0} \quad (2.42)$$

Onde  $G_p$  representa a condutância equivalente instantânea do circuito.

Também foram definidas pelo autor as parcelas denominadas de “**correntes de potência zero**” (zero power currents), como mostra (2.43).

$$i_{vz} = i_v - i_{vp} \quad (2.43)$$

Estas parcelas de corrente zero são ortogonais à tensão e, portanto, não transferem energia para a carga. Assim, a compensação destas parcelas poderia ser feita sem a necessidade de elementos armazenadores de energia.

Para melhor caracterizar os circuitos, o autor propõe outras decomposições. A primeira delas é a “**corrente ativa instantânea**”, responsável pela transferência de energia média para a carga, cuja expressão é exibida em (2.44).

$$i_{va} = \frac{P_{\Sigma}}{v_{\Sigma 0}^2} \cdot v_{v0} = G_a \cdot v_{v0} \quad (2.44)$$

Onde  $G_a$  representa a condutância equivalente média do circuito.

A outra parcela proposta é a “**corrente não-ativa**”, a qual está associada aos vários distúrbios e oscilações que afetam a potência instantânea, porém não transferem energia média para a carga. Esta parcela está mostrada em (2.45).

$$i_{vn} = i_v - i_{va} \quad (2.45)$$

Outra parcela proposta, e que apresenta grande interesse em compensação, é a “**corrente de variação**”, que poderia ser utilizada para compensar a parcela não ativa, resultando na maximização do fator de potência. Esta parcela está mostrada em (2.46).

$$i_{vv} = i_{vp} - i_{va} = i_{vn} - i_{vz} \quad (2.46)$$

De maneira geral, conclui-se que a teoria proposta por Depenbrock apresenta grande interesse para compensação utilizando filtros ativos, pois permite a compensação de parcelas independentes. Entretanto, esta teoria pode apresentar certas limitações no que se refere à associação com fenômenos físicos, uma vez que não separa as componentes

reativa e desequilíbrio da corrente total. Assim, nas componentes de corrente de variação e corrente de potência zero podem estar combinados os efeitos de reativos, desequilíbrios e distorções harmônicas, dificultando a compensação seletiva.

#### **2.5.4 Proposta de Tenti et al.**

Trata-se de uma proposta no domínio do tempo, que consiste numa expansão da teoria de Fryze para variáveis instantâneas e periódicas. Esta teoria vem sendo aperfeiçoada nos últimos anos e será discutida no Capítulo III deste trabalho. Maiores detalhes sobre esta teoria podem ser obtidos em [34-38].

A grande vantagem da teoria proposta por Tenti *et al.* está no fato de permitir a decomposição da corrente total em parcelas que estão associadas aos principais distúrbios encontrados nas instalações elétricas: reativos, desequilíbrios e distorções harmônicas. E sendo estas parcelas ortogonais, é possível realizar a compensação seletiva dos distúrbios.

# Capítulo III

## Teoria de Potência Conservativa - CPT

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos relacionados à Teoria de Potência Conservativa, cujo termo em inglês é CPT – *Conservative Power Theory*.

Esta teoria de potência foi proposta por Tenti *et al.* [34-38] e sua grande importância para as aplicações que envolvem os Filtros Ativos está no fato de permitir uma decomposição das correntes do circuito em componentes que podem ser associadas a fenômenos físicos específicos. Por exemplo, a corrente pode ser decomposta em parcelas associadas ao consumo de potência ativa (geração de trabalho), ao armazenamento de energia (formação dos campos elétrico e magnético em máquinas elétricas), aos desequilíbrios nos condutores (circuitos elétricos com cargas não equilibradas) e também às não-linearidades da carga (distorções na forma de onda). Pelo fato da decomposição das correntes estar baseada na aplicação das Leis de Kirchhoff e também do Teorema de Tellegen, demonstra-se que esta decomposição é válida para qualquer circuito elétrico polifásico, podendo ou não apresentar o condutor de retorno (neutro), e independente da forma de onda da tensão e da corrente elétrica

### 3.1 Definições Básicas

Na seqüência serão exibidas definições básicas as quais serão utilizadas na fundamentação da teoria CPT. Maiores detalhes podem ser obtidos por meio das publicações originais [34-38]. Todas as grandezas utilizadas consideram a existência de condições periódicas. As variáveis em negrito representam um vetor de múltiplas dimensões. Já o índice " $\mu$ " indica variáveis por fase. Assim, destacam-se:

#### 3.1.1 Potência Ativa Instantânea

A potência ativa instantânea é expressa por meio do produto escalar entre os vetores das tensões e das correntes presentes em cada fase do circuito, de acordo com (3.1).

$$p = v \circ i \quad (3.1)$$

### 3.1.2 Energia Reativa Instantânea

A energia reativa instantânea é dada pelo produto escalar entre o vetor das integrais imparciais (*unbiased*) das tensões de fase e o vetor das correntes no circuito, de acordo com (3.2).

$$w = \hat{\mathbf{v}} \circ \mathbf{i} \quad (3.2)$$

O termo *unbiased* vem do fato das integrais não apresentarem valor médio. Dessa forma, admitindo variáveis por fase, tais quantidades são calculadas através da diferença entre a integral no tempo de cada tensão de fase e seu respectivo valor médio por período ( $T$ ), de acordo com a expressão (3.3).

$$\begin{aligned} \hat{v}_\mu &= v_f - \bar{v}_f \\ v_f &= \int_0^T v_{\mu(\tau)} d\tau \\ \bar{v}_f &= \frac{1}{T} \int_0^T v_{\mu(\tau)} d\tau \end{aligned} \quad (3.3)$$

### 3.1.3 Potência Ativa

A potência ativa, designada por  $P$ , representa a potência média transferida para a carga em um período (convertida em trabalho), e possui definição idêntica a da potência ativa convencional. É obtida por meio do valor médio da equação (3.1), como mostra a expressão (3.4).

$$P = \bar{p} = \langle \mathbf{v}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{v}(t) \circ \mathbf{i}(t) dt \quad (3.4)$$

É interessante observar que, pelo fato da potência ativa  $P$  satisfazer o teorema de Tellegen, será conservativa em qualquer sistema elétrico. Em regime senoidal, a potência ativa  $P$  coincide com a potência ativa convencional.

### 3.1.4 Energia Reativa

A energia reativa, designada por  $W$ , é uma definição nova. Representa a energia média armazenada numa rede polifásica, em condição genérica, mesmo com tensões de alimentação distorcidas. É obtida por meio do valor médio da equação (3.2), como mostra a expressão (3.5).

$$W = \bar{w} = \langle \hat{\mathbf{v}}, \mathbf{i} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \hat{\mathbf{v}}(t) \circ \mathbf{i}(t) dt \quad (3.5)$$

Novamente é interessante observar que, pelo fato da energia reativa  $W$  satisfazer o teorema de Tellegen, também será conservativa em qualquer sistema elétrico. Em regime senoidal a energia reativa está relacionada com a potência reativa tradicional através da frequência fundamental ( $\omega$ ), de maneira que é possível escrever  $W = Q/\omega = U \cdot I \cdot \text{sen}(\varphi)/\omega$ .

## 3.2 Decomposição das correntes de fase

A partir das definições apresentadas nas equações (3.1) a (3.5), podem-se decompor as correntes de cada fase em sub componentes denominadas de: correntes ativas balanceadas, correntes reativas balanceadas, correntes ativas desbalanceadas, correntes reativas desbalanceadas e correntes residuais.

### 3.2.1 Corrente Ativa Balanceada

A corrente ativa balanceada representa a mínima parcela da corrente de uma determinada fase que efetua a transferência de energia ativa para a carga. É definida pela expressão (3.6).

$$i_{a\mu}^b = \frac{P}{\|\mathbf{v}\|^2} \cdot v_\mu = G^b \cdot v_\mu \quad (3.6)$$

O termo  $v_\mu$  representa a tensão instantânea em uma determinada fase ( $\mu$ ) e o termo  $G^b$  representa a **condutância equivalente** do circuito, possuindo o mesmo valor para todas as fases.

### 3.2.2 Corrente Reativa Balanceada

A corrente reativa balanceada representa a mínima parcela da corrente de uma determinada fase, sendo responsável pela transferência de energia reativa. Está relacionada diretamente com a energia média que está sendo trocada através do circuito. É definida pela expressão (3.7).

$$i_{r\mu}^b = \frac{W}{\|\hat{\mathbf{v}}\|^2} \hat{v}_\mu = B^b \cdot \hat{v}_\mu \quad (3.7)$$

O termo  $\hat{v}_\mu$  representa a integral *unbiased* (definida anteriormente) da tensão em uma determinada fase ( $\mu$ ) e o termo  $B^b$  representa a **reatividade equivalente** do circuito, possuindo o mesmo valor para todas as fases.

### 3.2.3 Corrente Ativa Desbalanceada

Esta parcela da corrente de uma determinada fase só existirá caso o sistema polifásico esteja desequilibrado. Isto pode ocorrer de duas formas: caso a carga que se esteja alimentando seja desequilibrada ou caso as tensões do sistema apresentem assimetrias. Para estas situações, a parcela de corrente ativa desequilibrada pode ser determinada por meio da expressão (3.8).

$$i_{a\mu}^u = (G_\mu - G^b) \cdot v_\mu \quad (3.8)$$

O termo  $G_\mu$  representa a **condutância** de cada fase ( $\mu$ ) e o termo  $G^b$  representa a **condutância equivalente** do circuito, e são dadas pelas expressões (3.9) e (3.10).

$$G_\mu = \frac{P_\mu}{\|v_\mu\|^2} \quad (3.9)$$

$$G^b = \frac{P}{\|v\|^2} \quad (3.10)$$

### 3.2.4 Corrente Reativa Desbalanceada

A parcela de corrente reativa desbalanceada aparece sempre que a carga do circuito possui natureza reativa (indutiva ou capacitiva) e esteja desequilibrada. É dada pela expressão (3.11).

$$i_{r\mu}^u = (B_\mu - B^b) \cdot \hat{v}_\mu \quad (3.11)$$

O termo  $B_\mu$  representa a **susceptância** de cada fase ( $\mu$ ) e o termo  $B^b$  representa a **susceptância equivalente** do circuito. Podem ser escritos pelas expressões (3.12) e (3.13).

$$B_\mu = \frac{W_\mu}{\|\hat{v}_\mu\|^2} \quad (3.12)$$

$$B^b = \frac{W}{\|\hat{v}\|^2} \quad (3.13)$$

### 3.2.5 Corrente de Desequilíbrio

A corrente de desequilíbrio em uma determinada fase ( $\mu$ ) é o resultado da soma da parcela de corrente ativa desbalanceada com a parcela de corrente reativa desbalanceada. É dada pela expressão (3.14).

$$i_{u\mu} = i_{a\mu}^u + i_{r\mu}^u$$

$$i_{u\mu} = (G_\mu - G^b) \cdot v_\mu + (B_\mu - B^b) \cdot \hat{v}_\mu \quad (3.14)$$

### 3.2.6 Corrente Residual

Esta parcela de corrente representa a parcela residual necessária para a totalização das correntes de fase. São também denominadas de correntes nulas (do termo em inglês “*void*”) porque não transferem qualquer tipo de potência ativa ou energia reativa. Esta corrente está relacionada com as não-linearidades presentes nas formas de onda das tensões e das correntes, e também com eventuais variações de parâmetros da carga em função das distorções na tensão de alimentação [34-38].

A corrente residual é definida pela expressão (3.15).

$$i_{v\mu} = i_{\mu} - i_{a\mu}^b - i_{a\mu}^u - i_{r\mu}^b - i_{r\mu}^u \quad (3.15)$$

## 3.3 Fator de Potência: um novo conceito

A teoria CPT, ao permitir a decomposição da corrente de cada fase nas sub-componentes anteriormente descritas, permite também que sejam redefinidos os conceitos de potência aparente e fator de potência, como será descrito a seguir. Também, a partir destas componentes de corrente, é possível definir outras parcelas de potência, as quais estão relacionadas a características específicas dos circuitos.

### 3.3.1 Potência Aparente

A potência aparente representa o produto das normas dos vetores de corrente e tensão do circuito e pode ser expressa pela expressão (3.16).

$$A = \|\mathbf{i}\| \cdot \|\mathbf{v}\| \quad (3.16)$$

De acordo com a teoria CPT, as parcelas de corrente anteriormente citadas são, por definição, ortogonais entre si. Dessa forma, o quadrado da norma do vetor de corrente pode ser expresso por meio da expressão (3.17).

$$\|\mathbf{i}\|^2 = \|\mathbf{i}_a^b\|^2 + \|\mathbf{i}_a^u\|^2 + \|\mathbf{i}_r^b\|^2 + \|\mathbf{i}_r^u\|^2 + \|\mathbf{i}_v\|^2 \quad (3.17)$$

Assim, reescrevendo a expressão da potência aparente em termos do quadrado do seu valor, obtém-se a expressão (3.18).

$$A^2 = \|\mathbf{i}\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2$$

$$A^2 = \|\mathbf{i}_a^b\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_a^u\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_r^b\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_r^u\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_v\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 \quad (3.18)$$

É interessante observar que cada parcela está associada a um determinado termo de potência. Organizando estes termos, é possível escrever a expressão (3.19).

$$A = \sqrt{P^2 + Q^2 + N_a^2 + N_r^2 + V^2} \quad (3.19)$$

### 3.3.2 Potência Complexa

A potência complexa, designada por  $S$ , leva em conta as parcelas de potência ativa ( $P$ ) e potência reativa ( $Q$ ). Assim, partindo das equações (3.18) e (3.19) é possível escrever a expressão (3.20).

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$S^2 = \|\mathbf{i}_a^b\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_r^b\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 \quad (3.20)$$

Esta potência complexa  $S$ , pela sua definição, corresponde à potência aparente convencional, em caso de formas de onda senoidais e equilibradas, pois leva em conta apenas as parcelas de potência ativa e potência reativa.

### 3.3.3 Potência de Desequilíbrio

A potência de desequilíbrio está associada a desequilíbrios de condutância e susceptância no circuito polifásico. Pode ser definida a partir das equações (3.18) e (3.19), de acordo com a expressão (3.21).

$$N^2 = N_a^2 + N_r^2$$

$$N^2 = \|\mathbf{i}_a^u\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 + \|\mathbf{i}_r^u\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 \quad (3.21)$$

A parcela  $N_a$  representa a parte **ativa** da potência de desequilíbrio e a parcela  $N_r$  representa sua parte **reativa**.

No caso de sistema **monofásico** ou sistema balanceado, a componente de potência de desequilíbrio será nula.

### 3.3.4 Potência de Distorção

A potência de distorção está relacionada com a corrente residual. Representa as não linearidades presentes no sistema, ou seja, está relacionada com a presença de cargas não-lineares no circuito.

Pode ser definida, a partir da equação (3.18) como mostra a expressão (3.22).

$$V^2 = \|\mathbf{i}_v\|^2 \cdot \|\mathbf{v}\|^2 \quad (3.22)$$

### 3.3.5 Fator de Potência Global (Trifásico)

O fator de potência global é um novo conceito introduzido pela teoria CPT e leva em consideração, além da presença de elementos armazenadores de energia no sistema elétrico (indutores e capacitores – que seria o caso de um sistema convencional em regime senoidal, equilibrado e alimentando cargas lineares), também o impacto de desequilíbrios, assimetrias e não linearidades do circuito elétrico, representado, respectivamente, pelas potências de desequilíbrio ( $M$ ) e de distorção ( $V$ ).

Dessa forma, o fator de potência global, designado por  $\lambda$ , é expresso pela relação entre a potência ativa  $P$  e a potência aparente  $A$ , de acordo com a expressão (3.23).

$$\lambda = \frac{P}{A} \quad (3.23)$$

Diante desta nova definição de fator de potência, mais abrangente que a convencional, podem-se fazer algumas considerações. A primeira delas é que não se pode mais classificar o fator de potência global como indutivo ou capacitivo, como era feito no caso convencional pois, levando em conta efeitos como desequilíbrio e distorção no sistema elétrico de potência, a classificação de indutivo ou capacitivo torna-se irrelevante. A segunda consideração é com relação ao valor de referência aceitável para o fator de potência global: as normas atuais (no Brasil) definem um valor mínimo aceitável para o fator de potência como sendo 0,92 indutivo para o sistema convencional. Conclui-se que este valor necessitaria de uma revisão minuciosa em caso de considerarmos os efeitos dos desequilíbrios e não linearidades das correntes no cálculo do fator de potência. Discussões iniciais neste sentido podem ser encontradas em [38].

# Capítulo IV

## Metodologia de Projeto do Filtro Ativo Paralelo

Neste capítulo são mostradas as principais expressões para o cálculo tanto dos dispositivos passivos do filtro (indutor de saída e banco de capacitores) como também dos dispositivos de chaveamento e de medição das grandezas do filtro ativo. Um exemplo de projeto será considerado no próximo capítulo.

Inicialmente, sugere-se a análise da carga através das decomposições propostas na CPT, ou seja, deve-se calcular as parcelas de corrente e potência da carga ou instalação que se deseja compensar. De posse destes valores, calcular os elementos do filtro conforme proposto nas próximas seções.

Serão utilizadas no projeto as variáveis especificadas na tabela 4.1

Tabela 4.1: Variáveis de projeto

Descrição	Símbolo	Unidade
Tensão de fase eficaz da rede elétrica	$V_{rede\_ef}$	V
Tensão no barramento CC	$V_{CC}$	V
Porcentagem de ondulação da corrente no indutor	$\Delta i_{LF}$	%
Porcentagem de ondulação da tensão do barramento CC	$\Delta V_{CC}$	%
Freqüência da rede	$f_{rede}$	Hz
Freqüência de chaveamento dos transistores	$f_s$	Hz
Máxima corrente da carga	$I_{carga\_max}$	A
Máxima derivada de corrente na carga	$dI_{carga\_max}/dt$	kA/s
Máxima corrente não ativa na carga	$I_{na\_max}$	A
Potência Reativa da carga (decomposição CPT)	Q	VAr
Potência de Desequilíbrio da carga (decomposição CPT)	N	VA
Potência Residual da carga (decomposição CPT)	V	VA

## 4.1 Projeto do indutor de saída

O indutor de saída pode ser calculado a partir da expressão (4.1), cuja demonstração detalhada pode ser encontrada em [18].

$$L_F = \frac{0,25 \cdot V_{CC}}{2 \cdot f_S \cdot \Delta I_{LF_{MAX}}} \quad (4.1)$$

Onde:  $V_{CC}$  é a tensão do barramento CC,  $\Delta I_{LF_{MAX}}$  é a máxima ondulação de corrente no indutor do filtro ativo e  $f_S$  é a frequência de chaveamento dos transistores.

A porcentagem de ondulação da corrente no indutor é definida por meio da expressão (4.2) [18].

$$\Delta i_{LF} = \frac{\Delta I_{LF_{MAX}}}{I_{rede\_pico}} \quad (4.2)$$

A corrente de pico, na linha de uma rede trifásica, pode ser calculada através da expressão (4.3).

$$I_{rede\_pico} = \sqrt{2} \cdot I_{rede\_ef} = \frac{\sqrt{2} \cdot Q_{CARGA}}{3 \cdot V_{rede\_ef}} \quad (4.3)$$

A máxima ondulação de corrente no indutor pode ser obtida por meio da expressão (4.4).

$$\Delta I_{LF_{MAX}} = \Delta i_{LF} \cdot I_{rede\_pico} \quad (4.4)$$

Dessa forma, voltando na expressão (4.1), obtém-se o valor da indutância do indutor de saída do filtro ativo paralelo (lembrando que este valor refere-se a cada fase do filtro trifásico).

Entretanto, uma maneira mais específica de calcular a ondulação de corrente no indutor e, conseqüentemente, sua indutância, é utilizar a corrente máxima que irá circular pelo filtro ativo paralelo. Como será visto no capítulo V, para cada configuração de carga simulada foram medidas: a máxima corrente circulante pela carga, a máxima derivada de corrente na carga e a máxima corrente não ativa na carga. Assim, durante o projeto do filtro ativo paralelo, deverá ser considerada a pior situação, ou seja, aquela onde é mais exigido. E isto ocorre quando o filtro deverá compensar toda a parcela não ativa da corrente da carga. Portanto, pode-se utilizar a expressão (4.5) para determinar a máxima ondulação de corrente no filtro ativo.

$$\Delta I_{LF_{MAX}} = \Delta i_{LF} \cdot I_{na\_max} \quad (4.5)$$

E, retornando para a expressão (4.1), determina-se a indutância  $L_F$  do indutor de saída.

Durante o funcionamento do filtro, este indutor apresentará uma reatância dada pela expressão (4.6).

$$X_{L_F} = 2\pi \cdot f_{rede} \cdot L_f \quad (4.6)$$

O indutor real apresenta uma parcela resistiva, a qual influencia no Fator de Qualidade e é responsável pelas perdas no cobre. Uma regra empírica para estimar esta parcela resistiva é considerá-la como sendo 10% do valor da reatância do indutor, na frequência de trabalho. Logo a resistência série do indutor de saída é dada pela expressão (4.7).

$$R_F = 0,1 \cdot X_{L_F} \quad (4.7)$$

É importante conhecer a variação da corrente no indutor, visto que o mesmo trabalha em modo chaveado. Dessa forma, demonstra-se em [18] que a derivada da corrente no filtro, em relação ao tempo, é dada pela expressão (4.8).

$$\frac{dI_F}{dt} = \frac{+V_{CC} - \sqrt{2} \cdot V_{rede\_ef} \cdot \text{sen}(\theta)}{L_F} \quad (4.8)$$

Desta expressão, percebe-se três momentos críticos: para  $\theta = 0^\circ$ ,  $\theta = 90^\circ$  e  $\theta = 270^\circ$ . Em cada uma destas situações, tem-se uma determinada derivada de corrente, sendo que a menor delas ocorre para  $\theta = 90^\circ$ . Isto significa que este valor deve ser maior que aquele determinado para a máxima derivada de corrente na carga, durante a simulação no capítulo V, a fim de garantir uma boa dinâmica de resposta para o filtro.

## 4.2 Projeto do banco de capacitores

O dimensionamento do banco de capacitores é baseado na energia que este deverá armazenar a fim de garantir o correto funcionamento do filtro ativo. Demonstra-se em [18] que o valor total do banco de capacitor que irá formar o elo CC do filtro ativo é dado pela expressão (4.9).

$$C_F = \frac{Q_{FILTRO}}{f_{rede} \cdot (V_{CCMAX}^2 - V_{CCMIN}^2)} \quad (4.9)$$

As tensões máxima e mínima no barramento CC podem ser calculadas por meio das expressões (4.10) e (4.11).

$$V_{CCMAX} = V_{CC} \cdot \left(1 + \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) \quad (4.10)$$

$$V_{CC_{MIN}} = V_{CC} \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) \quad (4.11)$$

A potência  $Q_{FILTRO}$  que aparece no cálculo do capacitor  $C_F$  representa a máxima potência que o filtro deverá manipular. Dessa forma, considerando a decomposição de potências da CPT,  $Q_{FILTRO}$  poderá ser qualquer uma das parcelas a ser compensada, ou seja, pode ser Q, N ou V. Considerando-se o pior caso, ou seja, a compensação de todos os distúrbios da carga, pode-se expressar a potência manipulada do filtro ativo através da expressão (4.12).

$$Q_{FILTRO} = \sqrt{Q^2 + N^2 + V^2} \quad (4.12)$$

### 4.3 Especificação do ganho dos transdutores de corrente

Esta especificação visa determinar o valor do ganho a ser aplicado nos transdutores que realizam a medição das correntes no filtro ativo e na carga. Tendo em vista que, na simulação do filtro ativo paralelo os valores das grandezas medidas são truncados entre -1 e +1, pode-se chegar ao ganho dos transdutores através de uma regra de três simples. É importante lembrar que deve ser mantida uma certa folga, a fim de evitar erros de leitura.

#### 4.3.1 Ganho do transdutor de corrente da carga

Aplicando-se a regra de três, obtém-se o ganho do transdutor da corrente da carga a partir da expressão (4.13).

$$K_{IL} = \frac{1}{I_{carga\_max}} \quad (4.13)$$

#### 4.3.2 Ganho do transdutor de corrente do filtro

Novamente aplicando-se uma regra de três simples, obtém-se o ganho do transdutor da corrente do filtro ativo a partir da expressão (4.14).

$$K_{IF} = \frac{1}{I_{na\_max}} \quad (4.14)$$

### 4.4 Especificação do ganho dos transdutores de tensão

Esta especificação visa determinar o valor do ganho a ser aplicado nos transdutores que realizam a medição das tensões na rede CA e no barramento CC. Tendo em vista que, na simulação do filtro ativo paralelo as grandezas medidas têm seus os valores truncados entre -1 e +1, é possível obter o ganho dos transdutores através de uma regra de três simples, lembrando que deve ser mantida certa uma folga, a fim de evitar erros na leitura.

#### 4.4.1 Ganho do transdutor de tensão da rede

Aplicando-se a regra de três, obtém-se o ganho do transdutor de tensão da rede a partir da expressão (4.15).

$$K_{VCA} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot V_{rede_{ef}}} \quad (4.15)$$

#### 4.4.2 Ganho do transdutor de tensão do barramento CC

Aplicando-se a regra de três, obtém-se o ganho do transdutor de tensão do barramento CC a partir da expressão (4.16).

$$K_{VCC} = \frac{1}{V_{CC_{MAX}}} \quad (4.16)$$

# CAPÍTULO V

## Simulações

A fim de estudar o comportamento das cargas e, também, permitir o dimensionamento dos elementos utilizados no filtro ativo paralelo (FAP), através do uso da CPT, a seguir serão apresentadas algumas simulações, considerando seis configurações distintas de carga.

Todas as simulações foram realizadas utilizando o software PSIM, versão 8.0.7, da Powersim [39]. Trata-se de uma ferramenta muito poderosa que permite simular, junto com os elementos do circuito (resistores, indutores, capacitores, chaves semicondutoras, etc.), uma biblioteca de vínculo dinâmico (DLL - *Dynamic Link Library*). São nestas DLLs que estão escritos os algoritmos de decomposição das correntes, através da CPT, e também os algoritmos de controle das malhas de corrente e tensão do filtro ativo paralelo. Estes algoritmos são escritos em linguagem C e compilados para o formato DLL através do software Visual Studio 2008, da Microsoft [40]. Os blocos de DLL representam, portanto, o processamento digital aplicado aos sinais de tensão e corrente obtidos através dos respectivos transdutores.

As simulações foram realizadas considerando-se um circuito elétrico trifásico a três fios, alimentado por um gerador senoidal ideal, a fim de compensar os efeitos de distorção na corrente provocados exclusivamente pela carga. Para tanto, foi utilizado um FAP Trifásico a Três Fios, como mostra o diagrama elétrico da figura 5.1. Neste diagrama é possível verificar que as tensões das fases são medidas em relação ao centro de um circuito em estrela, formado por três resistores idênticos de elevado valor. Também se observa que são medidas as correntes da rede, do filtro e da carga, através de transdutores de corrente. Na parte inferior da figura encontra-se o inversor trifásico do tipo fonte de tensão, composto por seis transistores IGBTs, divididos em três braços. Este inversor é comandado pelos sinais  $t_a$ ,  $t_b$  e  $t_c$ , os quais são gerados dentro de um sub-circuito denominado de Controle do Filtro Ativo onde, inclusive, é definida a respectiva estratégia de compensação a ser efetuada pelo filtro ativo (geração da referência do FAP). Ainda no que se refere ao inversor,

tem-se o banco de capacitores, representado pelo capacitor  $C_F$  e o indutor de saída, representado pelos indutores  $L_F$  e pelos resistores  $R_F$ .

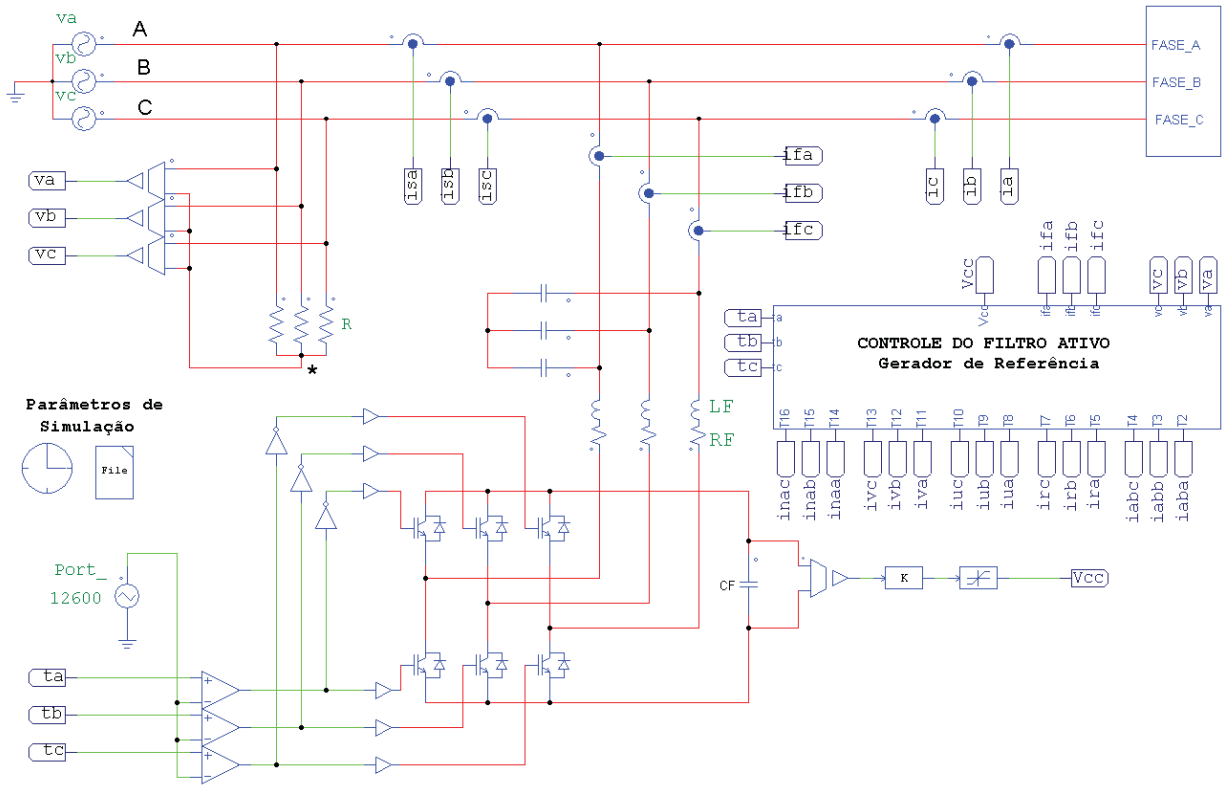


Figura 5.1: Diagrama Elétrico do Filtro Ativo Paralelo Trifásico a 3 Fios utilizado nas simulações.

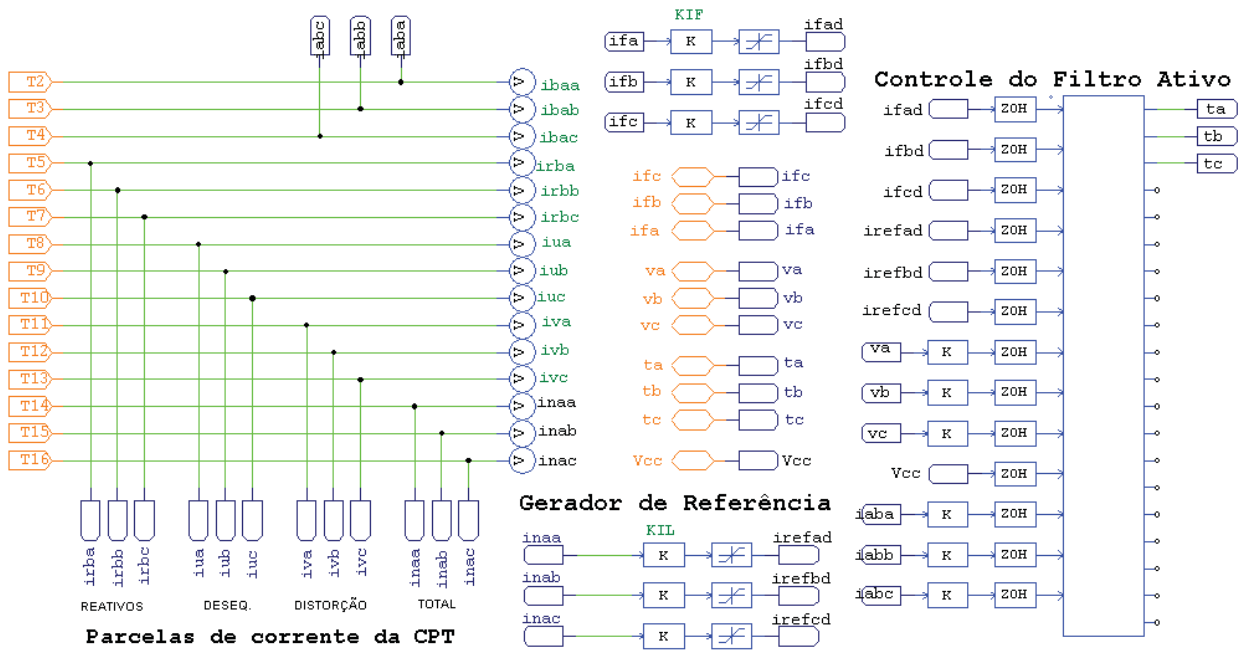


Figura 5.2: Sub-circuito para geração das referências de corrente e controle do Filtro Ativo Paralelo.

É interessante destacar que o sub-circuito de Controle do Filtro Ativo recebe não apenas as correntes medidas no circuito principal, mas também sinais provenientes de outros blocos chamados de DLL, os quais são interpretados pelo simulador durante o processo de simulação, juntamente com os componentes elétricos. São nestes blocos DLL que estão escritos os algoritmos da CPT para a decomposição das correntes e, também, os algoritmos para determinação de valores eficazes (RMS) e taxas de distorção harmônica (DHT). Todos os algoritmos estão escritos em linguagem C. A figura 5.2 destaca o sub-circuito de controle do FAP e a figura 5.3 os respectivos blocos de DLL.

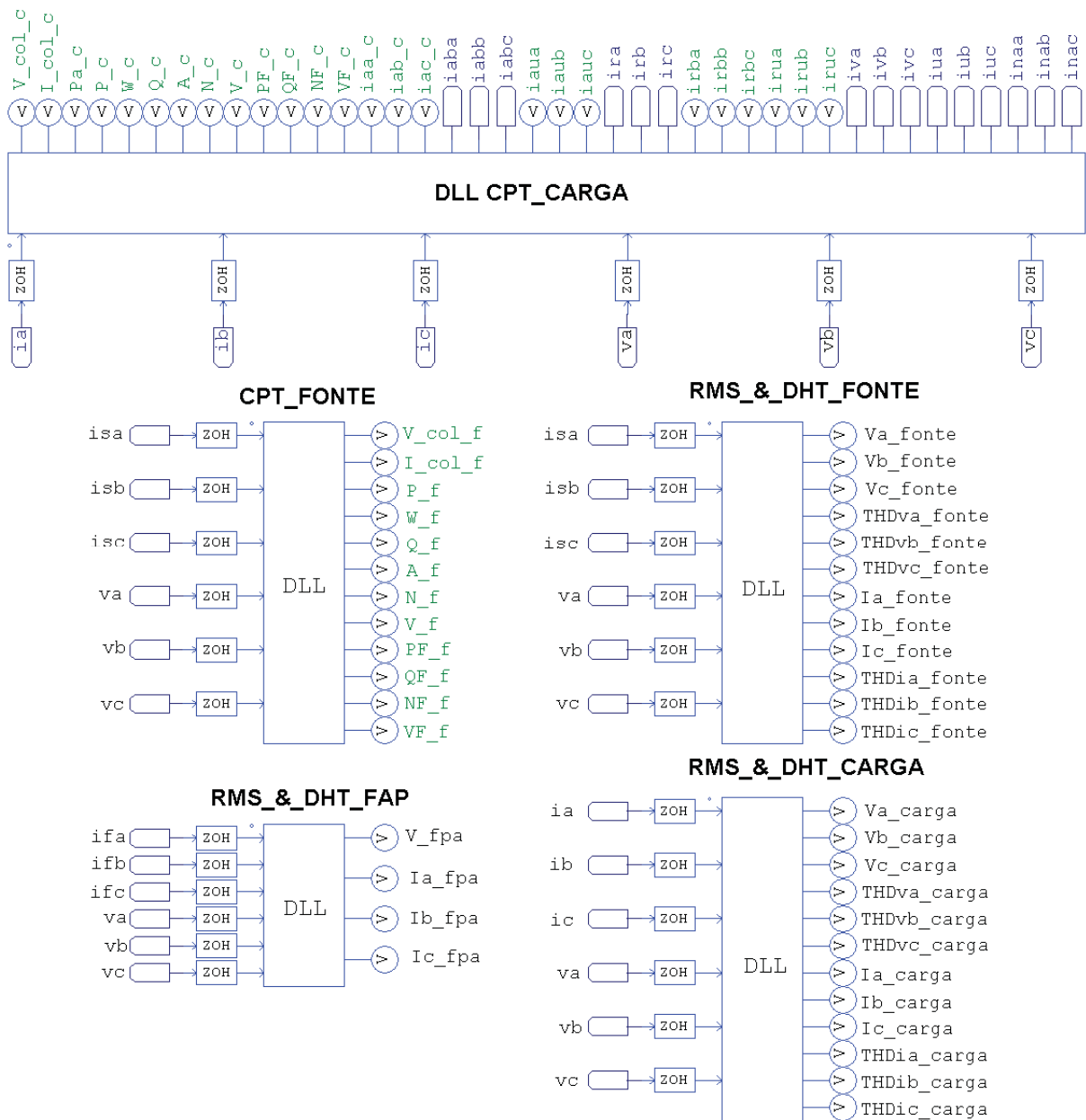


Figura 5.3: Blocos de DLL utilizados para a decomposição das correntes pela CPT, na fonte e na carga, e para o cálculo de valores eficazes (RMS) e das taxas de distorção harmônica (DHT).

A escolha dos valores das cargas simuladas foi determinada considerando uma futura implementação prática, que não faz parte do escopo deste trabalho, porém está dentro do universo de materiais e equipamentos disponíveis no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI/UNESP). Dessa forma, os resultados de simulação são aplicados para cargas cuja potência aparente é da ordem de 10 kVA.

## 5.1 – Primeiro Caso: Carga Resistiva Equilibrada

Nesta simulação será utilizada uma carga resistiva trifásica, balanceada, com potência de 10 kW. Assumindo tensão eficaz de linha de 220V, os resistores terão valor aproximado de  $14,5 \Omega$ . A figura 5.4 ilustra a configuração da carga:

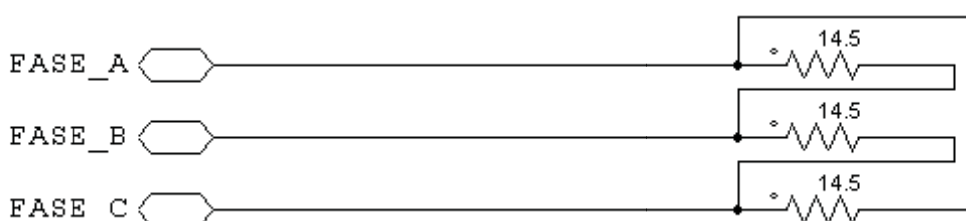


Figura 5.4: Carga resistiva trifásica balanceada de 10 kW

Realizando a simulação desta carga obtêm-se as formas de onda ilustradas na figura 5.5. De cima para baixo, são exibidas, para cada fase, as correntes de linha, as componentes ativas balanceadas e as componentes reativas balanceadas.

Como se pode observar pelas simulações, as correntes totais em cada fase aparecem livres de distorção e possuem a mesma amplitude. Observando as componentes ativas balanceadas, percebe-se que os valores estão muito próximos das correntes totais. E não poderia ser diferente, pois sendo a carga resistiva e balanceada, as componentes reativas e de distorção resultam nulas. Isto pode ser comprovado pela curva inferior da figura 5.5, onde estão sendo exibidas as componentes reativas balanceadas de cada fase. É interessante notar que os valores estão na faixa de micro-ampères, sendo desprezíveis em relação às componentes ativas, e praticamente nulas. Geralmente esta diferença entre o valor esperado e o valor simulado deve-se a problemas de arredondamentos de casas decimais (exatidão) durante o processo de simulação.

Este caso é apenas uma ilustração das potencialidades da Teoria CPT. Vale a pena ressaltar que não existem parcelas a serem compensadas, uma vez que não há distorção, reativos e nem desequilíbrios.

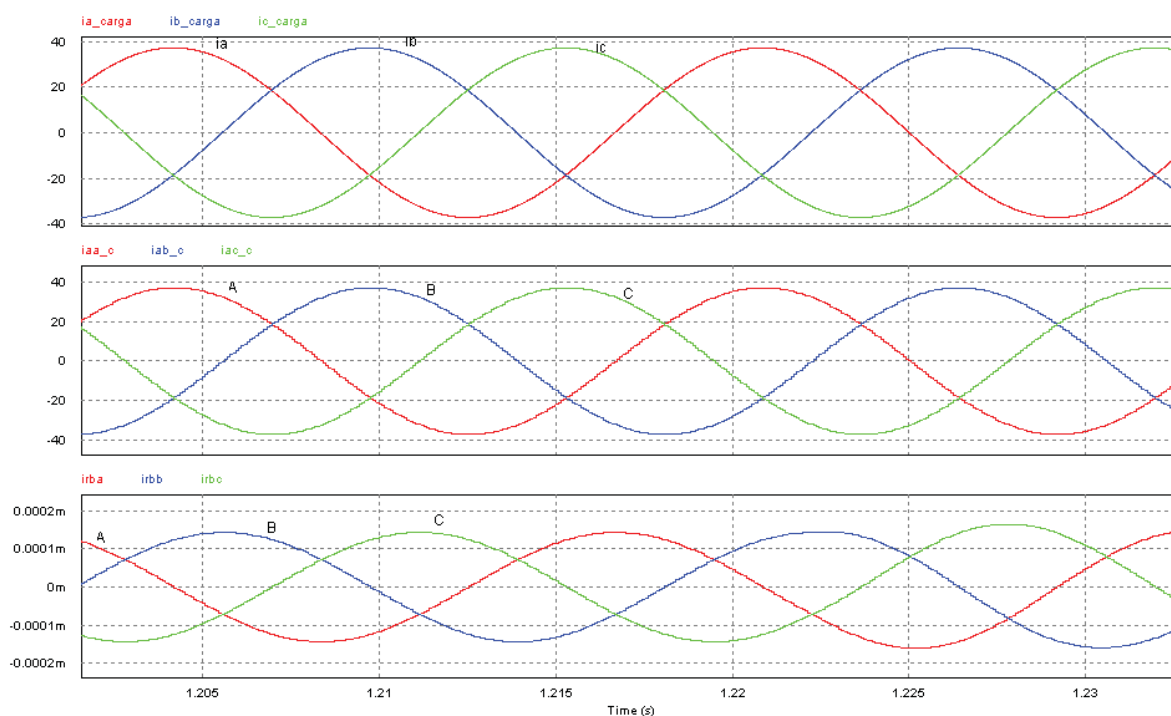


Figura 5.5: Correntes em cada fase: total, componente ativa balanceada e componente reativa balanceada.

A partir da decomposição resultante de aplicação da teoria CPT na carga, obtém-se as parcelas de potência exibidas na tabela 5.1

Tabela 5.1: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga R equilibrada.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	10,055 [kVA]
Potência Ativa (P)	10,055 [kW]
Potência Reativa (Q)	0 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,002 [VA]
Potência de Distorção (V)	0,002 [VA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	1,00
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	37,2 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $dI_{carga}/dt$ )	14 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	0 [A]

A partir desta apresentação da teoria CPT, pode-se realizar uma série de alterações na natureza da carga, a fim de determinar as novas parcelas de potência. A primeira modificação a ser realizada é desequilibrar a carga.

## 5.2 – Segundo Caso: Carga Resistiva Desequilibrada

Para esta simulação, apenas um dos resistores de carga será modificado. A figura 5.6 ilustra a nova configuração da carga.

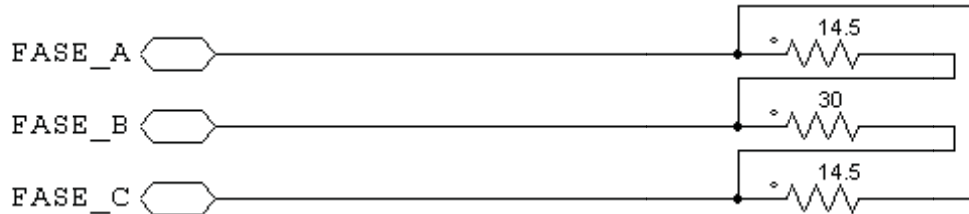


Figura 5.6: Carga Resistiva Desequilibrada

Realizando a simulação desta carga através da Teoria CPT, é possível observar o comportamento de cada parcela de corrente. Na figura 5.7 estão mostrados os resultados de simulação, onde se pode observar, de cima para baixo, a corrente total de cada fase, as parcelas ativas balanceada e desbalanceada de cada fase e, por fim, a parcela de corrente reativa balanceada.

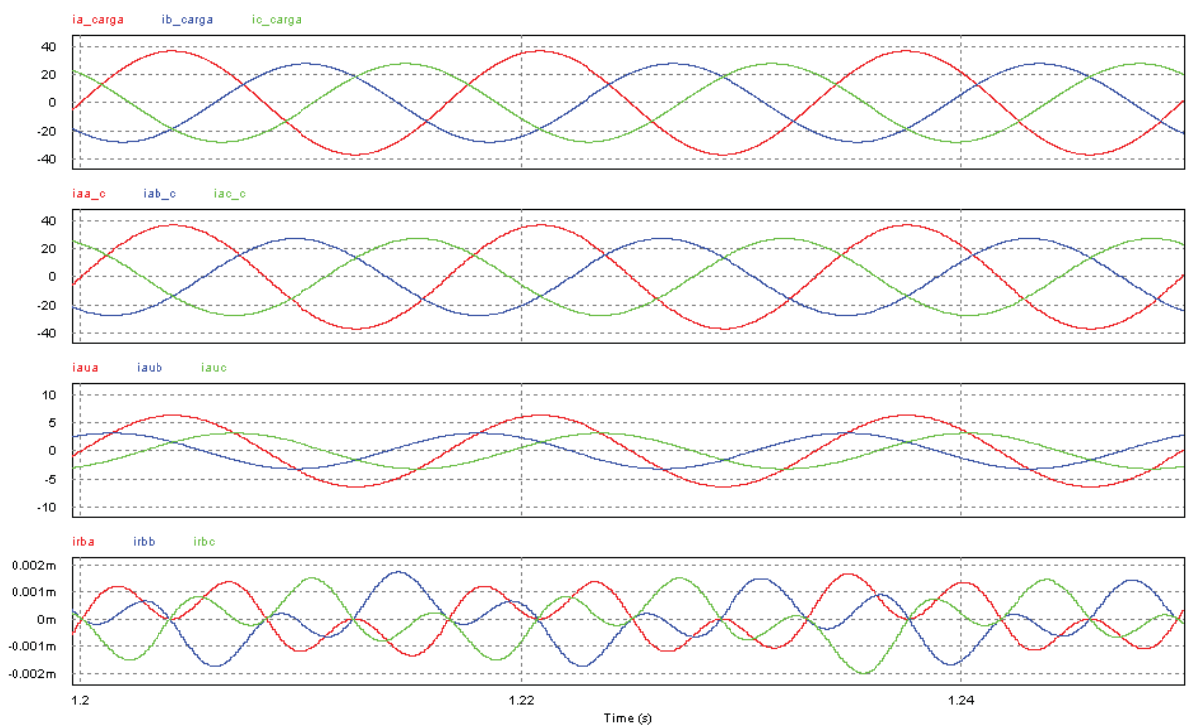


Figura 5.7: Decomposição das parcelas de corrente: total, ativa balanceada, ativa desbalanceada e reativa balanceada.

Analisando as formas de onda apresentadas na figura 5.7 percebe-se que, agora, além das componentes ativas balanceadas aparecem também correntes ativas

desbalanceadas, resultantes da alteração na carga. Embora os resistores apresentem valores distintos, a natureza da carga continua sendo resistiva. Assim, a parcela de correntes reativas balanceadas continua sendo desprezível.

A partir da decomposição resultante de aplicação da teoria CPT na carga, obtém-se as seguintes parcelas de potência, exibidas na tabela 5.2

Tabela 5.2: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga R desequilibrada

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	8,502 [kVA]
Potência Ativa (P)	8,323 [kW]
Potência Reativa (Q)	0 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	1,732 [kVA]
Potência de Distorção (V)	0,002 [VA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,979
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	37,2 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $dI_{carga}/dt$ )	14 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	6,4 [A]

Dos resultados apresentados na tabela 5.2, conclui-se que a potência aparente total é quase que formada pela parcela de potência ativa. Existe, porém, uma pequena parcela referente ao desequilíbrio, o que explica a pequena redução no fator de potência. É interessante observar que, mesmo com o desequilíbrio, a parcela de potência reativa continua sendo nula, devido à ausência de elementos armazenadores de energia.

Aplicando o filtro ativo paralelo e selecionando a compensação de desequilíbrio, as formas de onda da corrente após a compensação deverão apresentar as mesmas amplitudes entre fases. A figura 5.8 ilustra o resultado obtido após a atuação do filtro ativo. As curvas superiores mostram as correntes em cada fase e a curva inferior mostra a tensão da fase A. Pode-se perceber claramente a compensação do desequilíbrio e que as correntes estão em fase com as tensões, característica de carga resistiva.

Aplicando a teoria CPT nos resultados obtidos após a atuação do FAP, têm-se as parcelas de potência apresentadas na tabela 5.3. Como se pode observar pelos valores apresentados, houve uma expressiva redução na potência de desequilíbrio (em torno de 97%) em comparação com a situação onde não havia compensação. O fator de potência

subiu para 0,998 e as demais potências permaneceram com valores praticamente insignificantes.

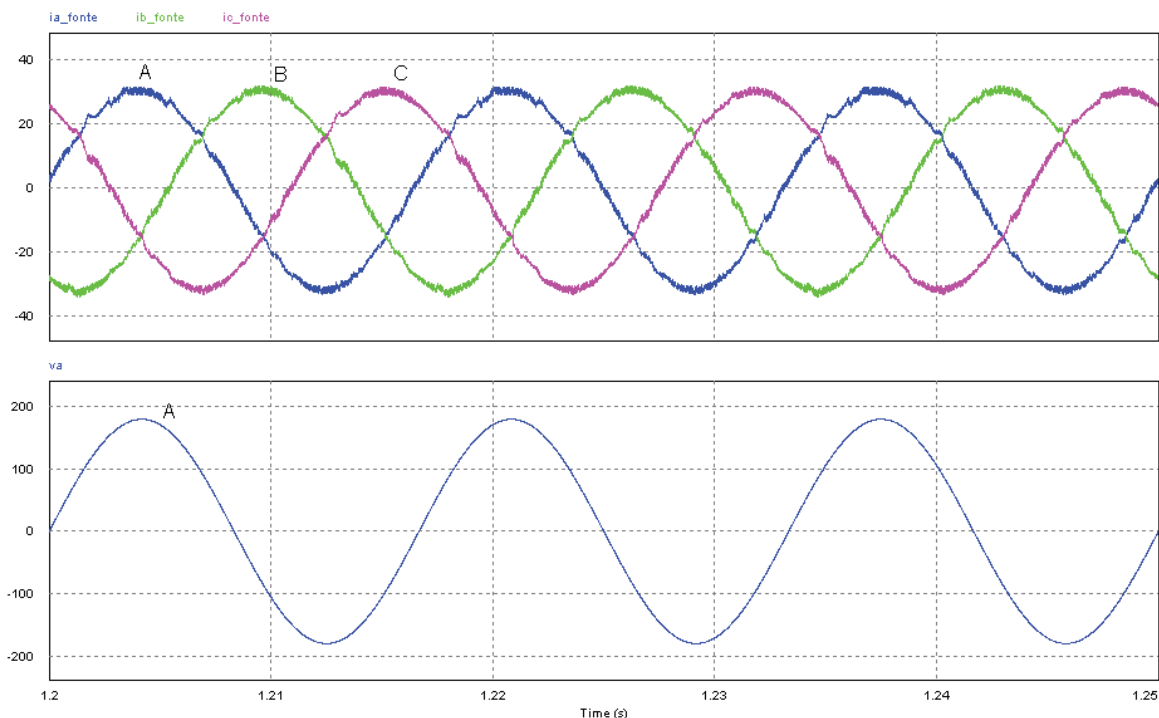


Figura 5.8: Corrente total das fases, após a atuação do FAP em uma carga R desequilibrada (superior) e tensão do gerador na fase A (inferior).

Tabela 5.3: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga R desequilibrada após FAP

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	8,293 [kVA]
Potência Ativa (P)	8,281 [kW]
Potência Reativa (Q)	0,362 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,051 [kVA]
Potência de Distorção (V)	0,266 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,998
Corrente Eficaz do Filtro Ativo ( $I_{F\_RMS}$ )	5,4 [A]

A próxima alteração a ser feita na carga é acrescentar um elemento armazenador de energia (indutor) e analisar o comportamento da corrente na carga e no gerador, antes e depois da atuação do filtro ativo.

### 5.3 – Terceiro Caso: Carga Resistiva + Indutiva Equilibrada

Para esta simulação será utilizada uma carga com as características ilustradas pela figura 5.9. Foram mantidos os valores dos resistores, a fim de manter a potência ativa da carga em torno dos 10 kW. Porém, foram adicionados indutores a fim de acrescentar uma quantidade de potência reativa à carga. Tais indutores apresentam indutância de 20 mH.

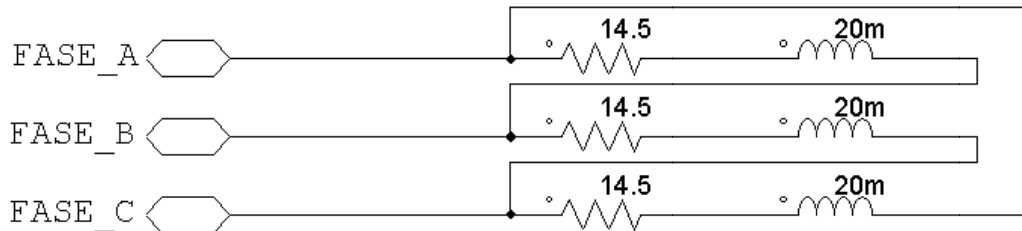


Figura 5.9: Carga RL balanceada

Analisando as correntes das fases, percebe-se que todas estão equilibradas, livres de distorções e com uma pequena defasagem em relação a tensão. Para melhor ilustrar este resultado, a figura 5.10 ilustra, na curva superior, as correntes da carga em cada fase e na curva inferior, a tensão da fase A.

Aplicando a teoria CPT para analisar a carga, é possível ver a decomposição das correntes totais nas componentes ativa balanceada e desbalanceada e reativa balanceada e desbalanceada, como mostrado na figura 5.11

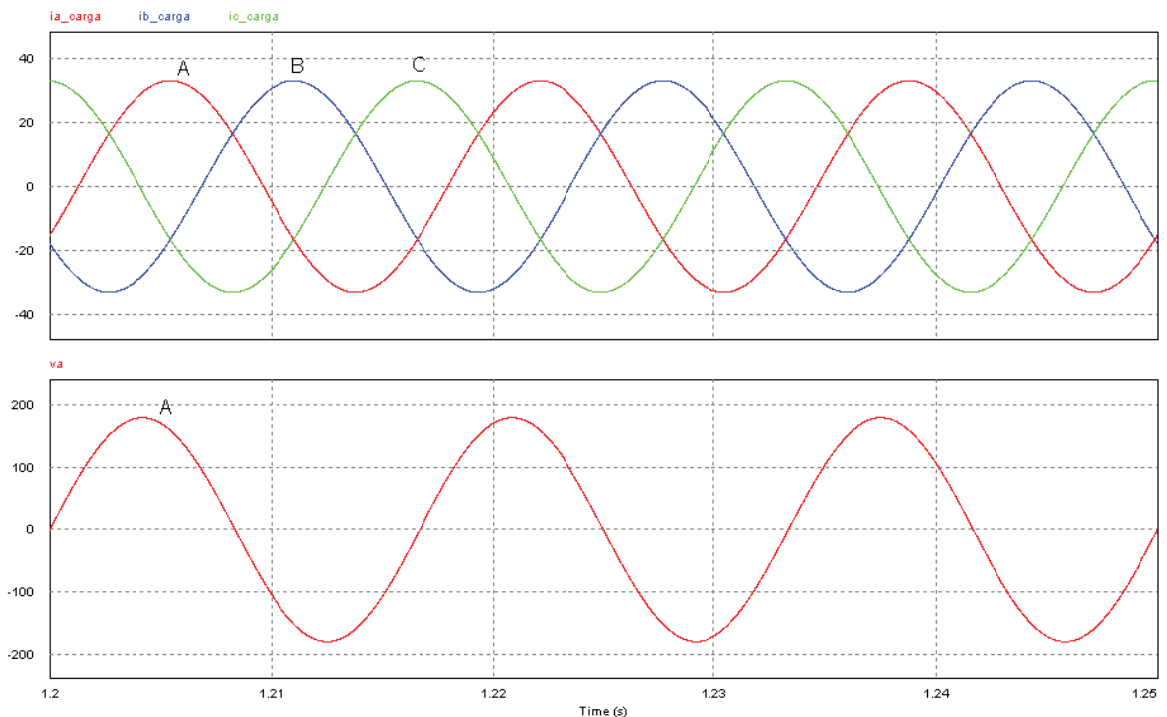


Figura 5.10: Correntes na carga em cada fase (superior) e tensão da fase A (inferior).

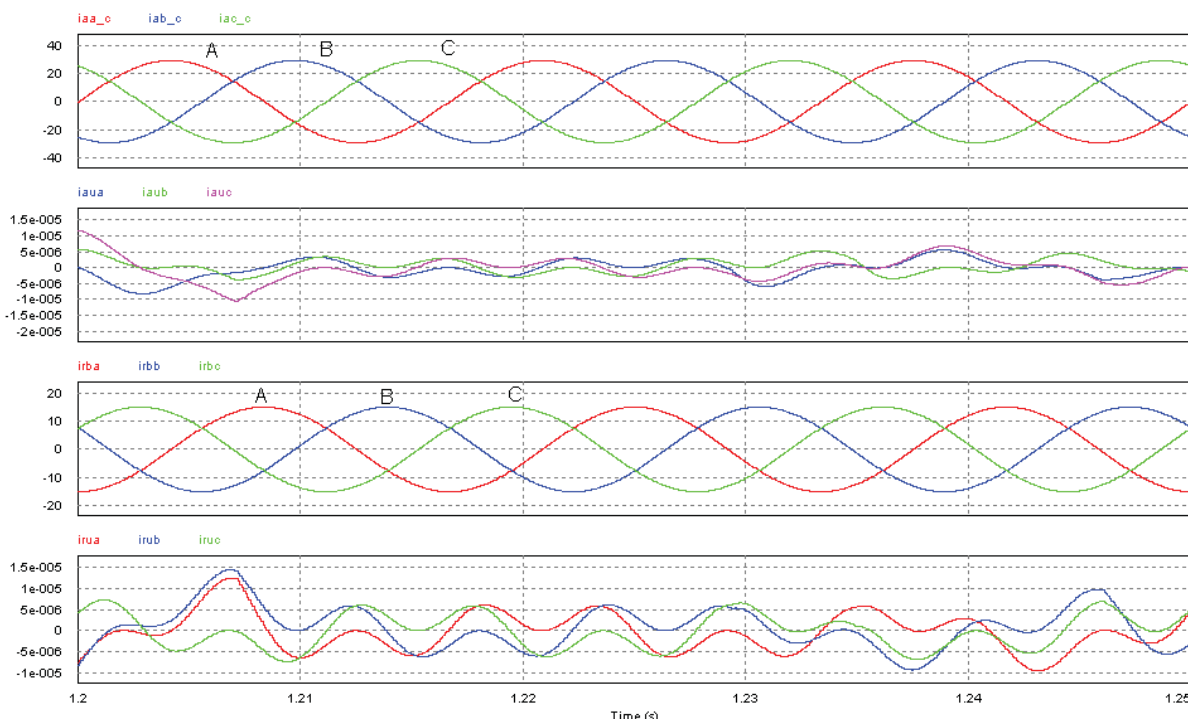


Figura 5.11: Decomposição da corrente total em componentes ativas balanceada e desbalanceada (superiores) e componentes reativas balanceada e desbalanceada (inferiores).

Pela figura 5.11 é possível observar que as componentes desbalanceadas (tanto ativa quanto reativa) são praticamente desprezíveis (na faixa de micro-ampères), pois a carga não apresenta desequilíbrio. As componentes balanceadas (tanto ativas quanto reativas) possuem defasagem angular de 90°.

Novamente aplicando a teoria CPT, obtêm-se as componentes de potência exibidas na tabela 5.4.

Tabela 5.4: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga RL equilibrada.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	8,919 [kVA]
Potência Ativa (P)	7,914 [kW]
Potência Reativa (Q)	4,114 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,002 [VA]
Potência de Distorção (V)	0,147 [VA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,887
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	33,0 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $di_{carga}/dt$ )	12,4 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	15,2 [A]

Acionando o filtro ativo paralelo, e compensando a componente reativa da corrente da carga, obtêm-se as formas de onda de corrente na fonte mostradas na figura 5.12

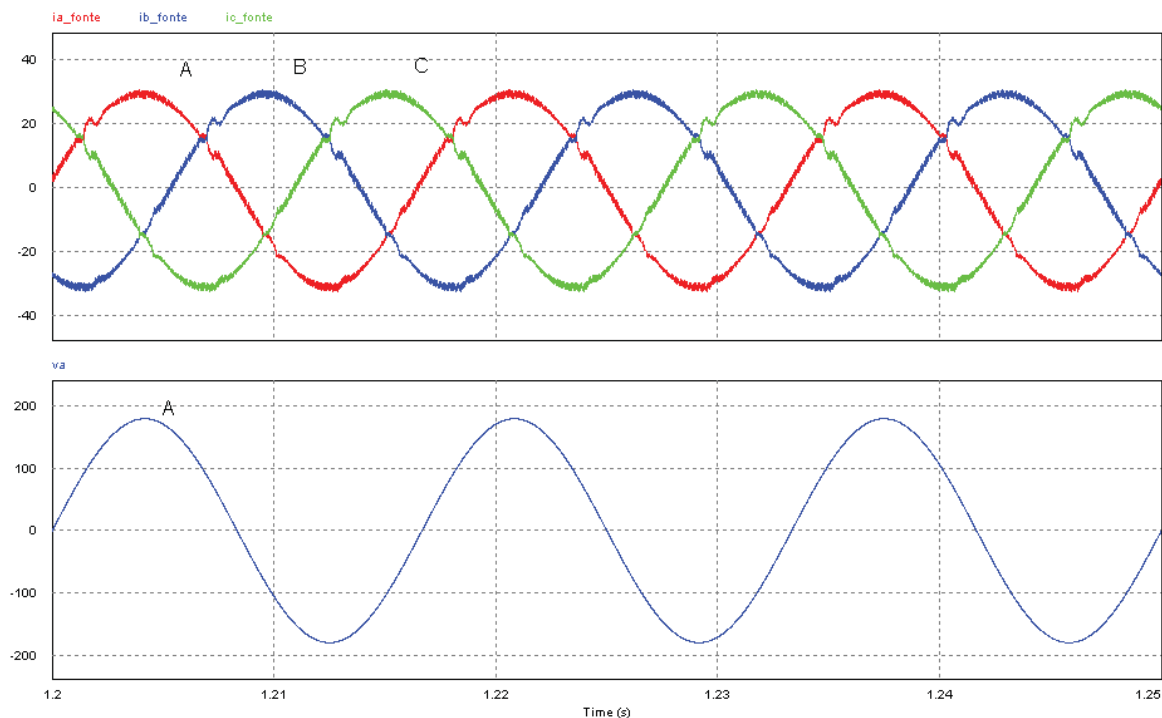


Figura 5.12: Forma de onda das correntes nas fases da fonte, após o acionamento do FAP (superior) e tensão na fase A (inferior).

Como se pode observar na figura 5.12, as correntes totais possuem mesma amplitude (pois não existem desequilíbrios na carga) e acompanham as tensões (observe a fase A), comprovando a compensação dos reativos.

Aplicando a teoria CPT após a atuação do filtro ativo paralelo, as componentes de potência obtidas estão mostradas na tabela 5.5.

Tabela 5.5: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga RL equilibrada após o FAP.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	8,001 [kVA]
Potência Ativa (P)	7,995 [kW]
Potência Reativa (Q)	0,383 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,011 [VA]
Potência de Distorção (V)	0,246 [VA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,998
Corrente Eficaz do Filtro Ativo ( $I_{F\_RMS}$ )	11,8 [A]

Como se pode observar, a potência ativa praticamente não sofreu alteração. Já a potência reativa sofreu uma redução de praticamente 90%. As componentes de desequilíbrio e residual são desprezíveis. O fator de potência, neste caso, subiu e ficou muito próximo da unidade.

A próxima modificação visa provocar um desbalanceamento na carga RL.

#### 5.4 – Quarto Caso: Carga Resistiva + Indutiva Desequilibrada

Para esta nova simulação a carga RL anterior será desequilibrada por meio da adição de mais um ramo RL em cada par de fases. A configuração da carga utilizada está ilustrada na figura 5.13.

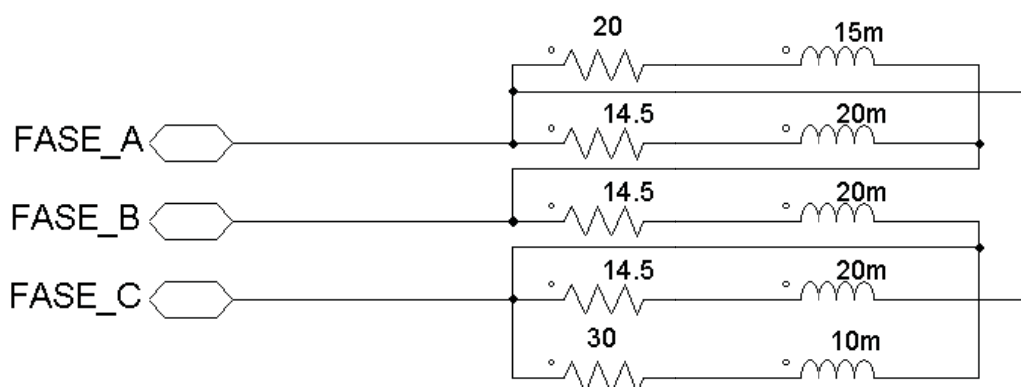


Figura 5.13: Carga RL desbalanceada.

Colocando esta carga no circuito e realizando a simulação, obtêm-se as formas de onda apresentadas na figura 5.14, onde são exibidas no gráfico superior as correntes totais das fases e, no gráfico inferior, as tensões de cada fase. É interessante observar que as correntes possuem amplitudes diferentes (devido a diferença de impedância em cada ramo) e, cada uma, apresenta uma defasagem diferente em relação a respectiva tensão (pois as indutâncias são diferentes).

Aplicando a teoria CPT na carga RL desequilibrada é possível obter as componentes ativas balanceada e desbalanceada e as componentes reativas balanceada e desbalanceada, como mostra a figura 5.15.

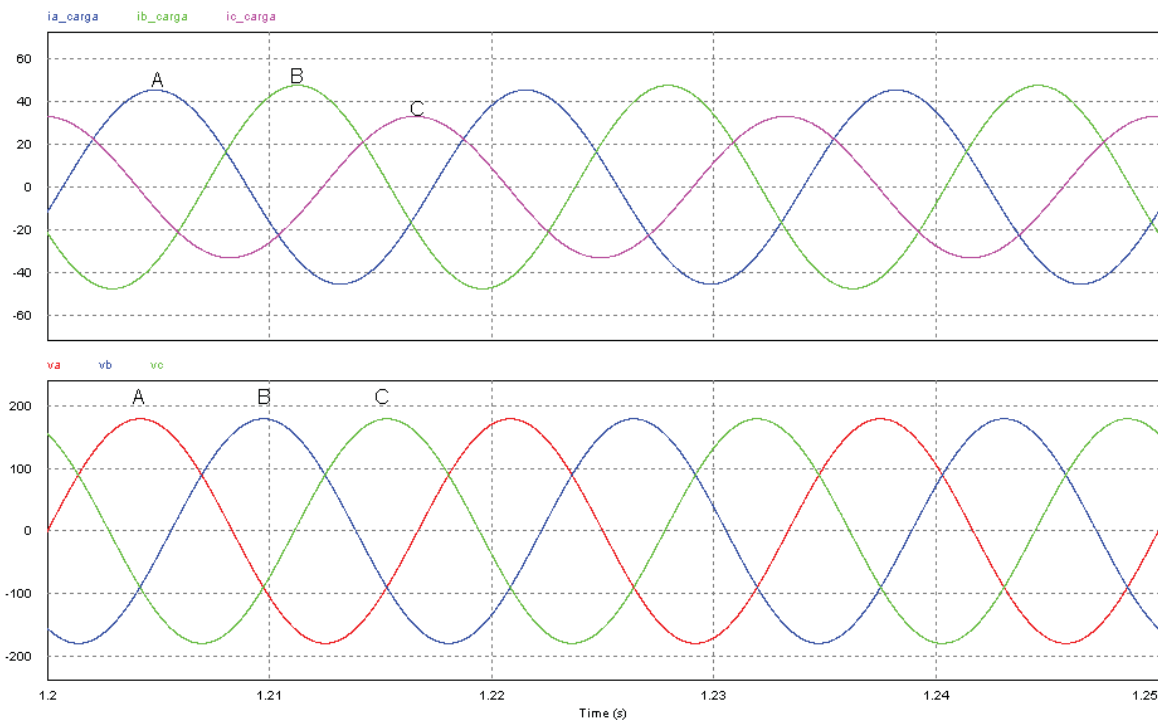


Figura 5.14: Correntes totais nas fases para uma carga RL desequilibrada (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior).

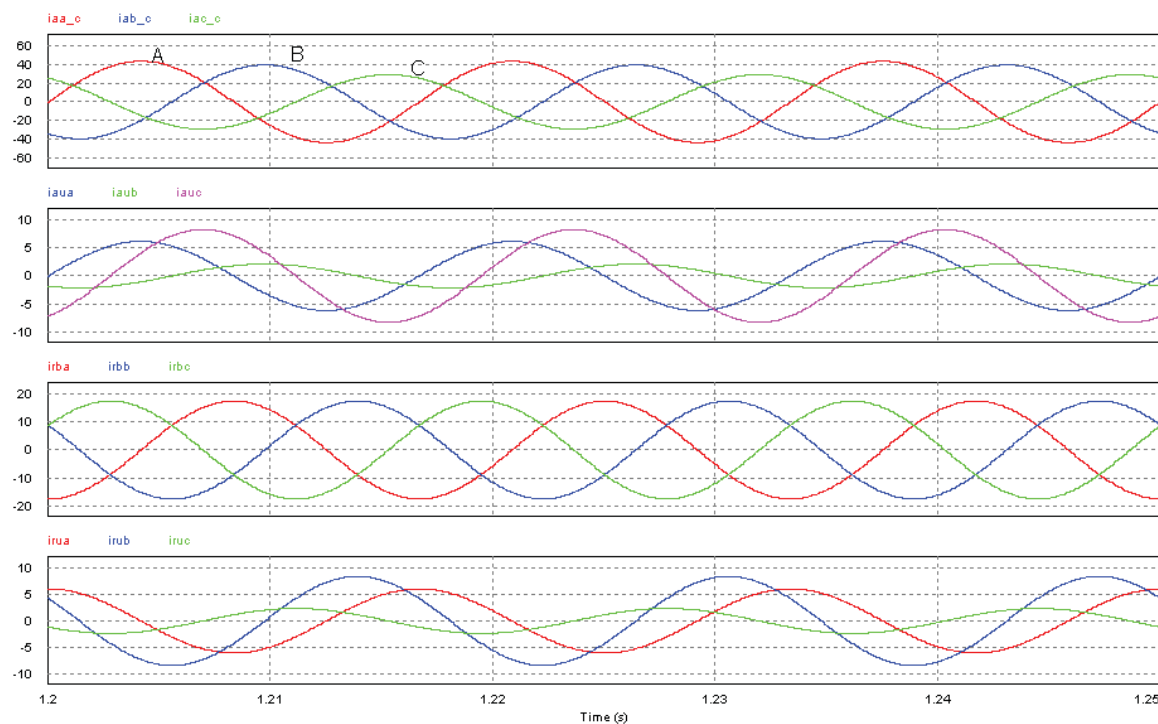


Figura 5.15: Correntes ativas balanceada e desbalanceada em cada fase (superiores) e correntes reativas balanceada e desbalanceada em cada fase (inferiores).

Neste caso é fácil perceber que todas as componentes apresentam valores expressivos. Aplicando a teoria CPT obtém-se os valores das componentes de potência mostrados na tabela 5.6.

Tabela 5.6: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga RL desequilibrada.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	11,459 [kVA]
Potência Ativa (P)	10,163 [kW]
Potência Reativa (Q)	4,750 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	2,338 [kVA]
Potência de Distorção (V)	0,219 [VA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,887
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	47,5 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $dl_{carga}/dt$ )	17,9 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	26,1 [A]

Como se observa na tabela 5.6, todas as componentes de potência são expressivas, exceto a potência residual. Isto é decorrente do fato de que a carga, embora desequilibrada, é de natureza linear (apenas resistores e indutores). Isto explica a existência de potência ativa, reativa e desequilíbrio e a ausência da potência residual.

Para esta carga é possível realizar a compensação total dos distúrbios (reativos e desequilíbrio) ou mesmo realizar uma compensação **seletiva** (ora compensando apenas reativos, ora compensando apenas os desequilíbrios).

Ajustando o FAP para uma compensação **total** dos distúrbios, obtém-se as formas de onda da corrente no gerador exibidas na figura 5.16. Pode-se verificar que houve compensação de desequilíbrios (pois as correntes têm a mesma amplitude) e também de reativos, já que as correntes estão em fase com as respectivas tensões.

O FAP também pode ser configurado para compensar apenas os **desequilíbrios** na carga. O resultado desta compensação está exibido na figura 5.17. É interessante notar que as correntes totais das fases apresentam a mesma amplitude, porém estão defasadas em relação às respectivas tensões.

Na figura 5.18 estão exibidas as correntes totais por fase considerando que o FAP foi configurado para efetuar uma compensação apenas dos **reativos**. Como se pode observar, todas as correntes estão em fase com as respectivas tensões.

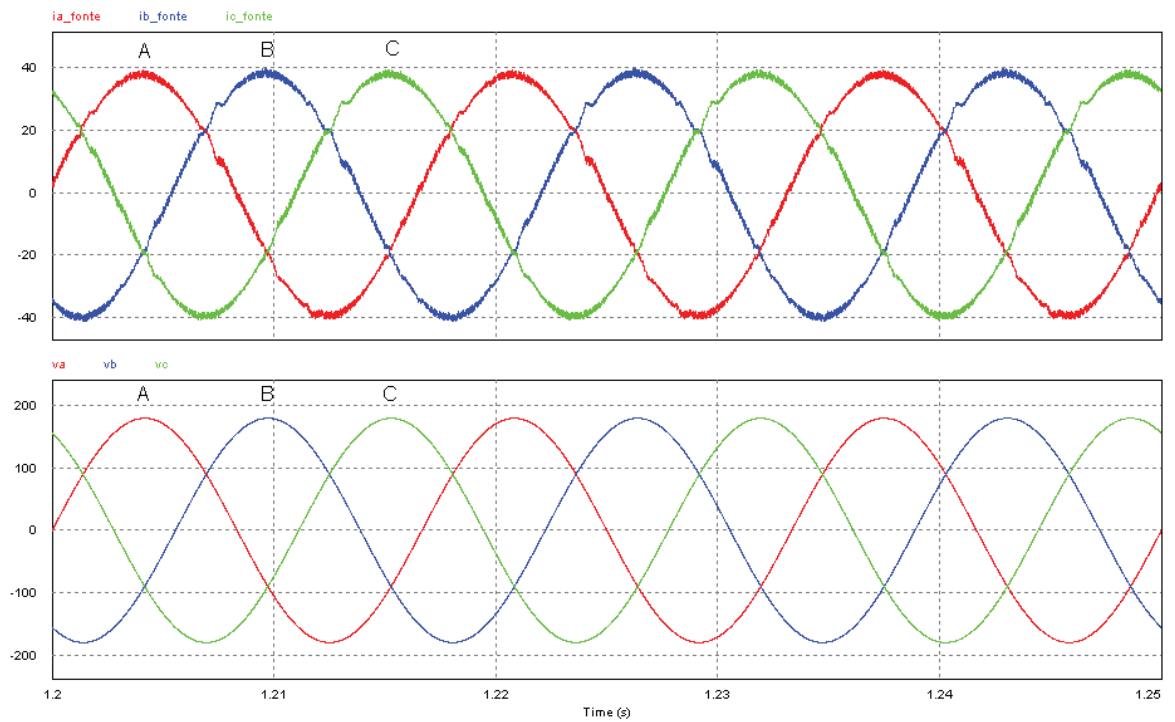


Figura 5.16: Correntes totais nas fases (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação **total** dos distúrbios (desequilíbrios e reativos).

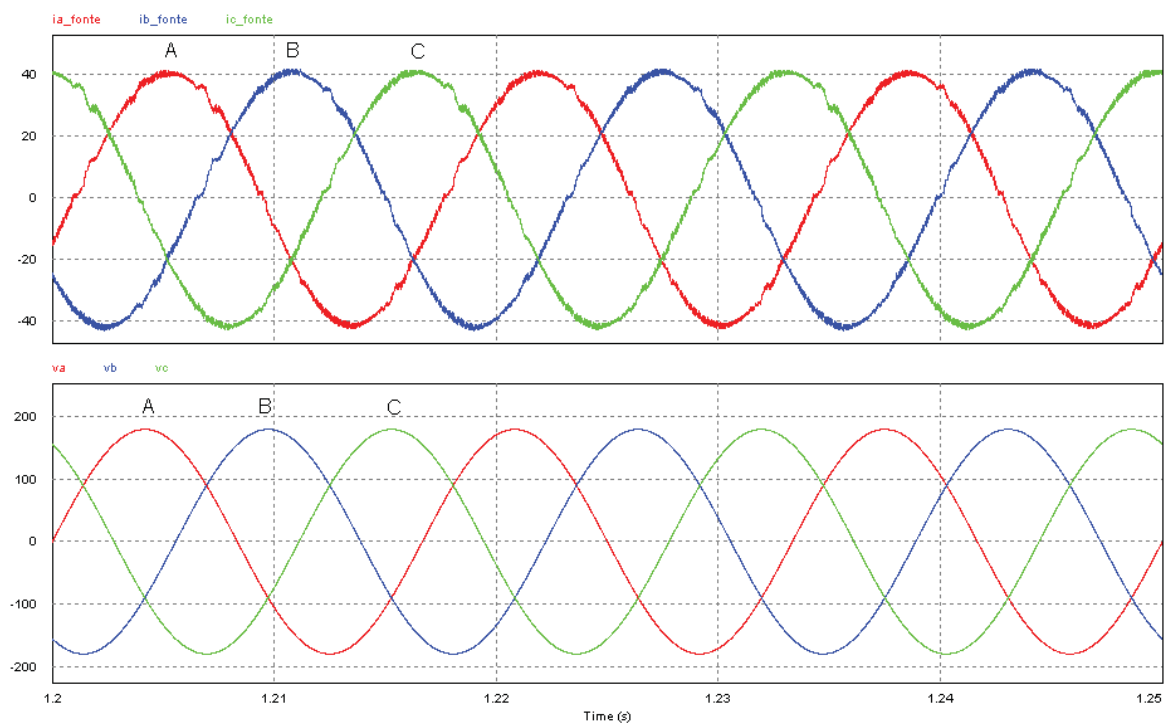


Figura 5.17: Correntes totais nas fases (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação apenas dos **desequilíbrios**.

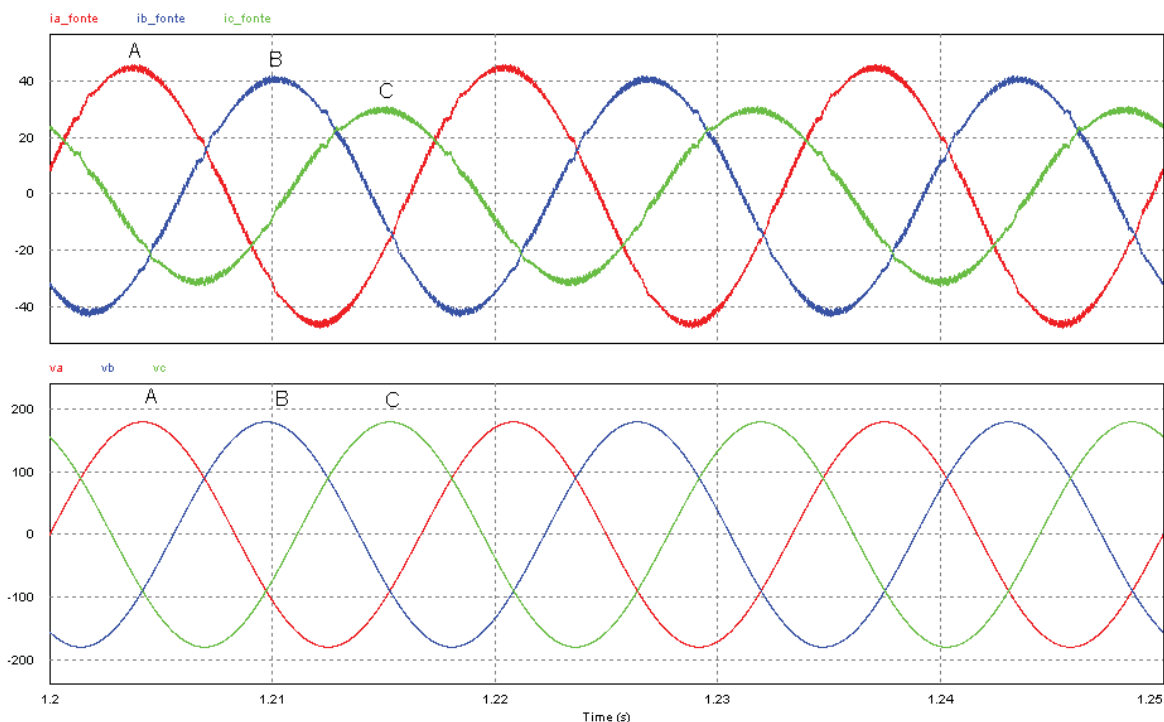


Figura 5.18: Correntes totais nas fases (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação apenas dos **reativos**.

Tabela 5.7: Valores de potência calculados pela CPT – Carga RL desequilibrada após o FAP.

Parâmetro Medido	Sem Compens.	Tipo de Compensação		
		Total	Deseq.	Reativos
Potência Aparente (A)	11,459 [kVA]	10,354 [kVA]	11,042 [kVA]	10,558 [kVA]
Potência Ativa (P)	10,163 [kW]	10,344 [kW]	10,129 [kW]	10,287 [kW]
Potência Reativa (Q)	4,750 [kVA]	0,380 [kVA]	4,387 [kVA]	0,380 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	2,338 [kVA]	0,070 [kVA]	0,071 [kVA]	2,337 [kVA]
Potência de Distorção (V)	0,219 [VA]	0,250 [kVA]	0,270 [kVA]	0,218 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,887	0,999	0,917	0,974
Corrente Eficaz do FAP ( $I_{F\_RMS}$ )	-	19,5 [A]	7,1 [A]	13,5 [A]

Pela tabela 5.7 percebe-se que na compensação total dos distúrbios, o Fator de Potência apresentou o valor mais elevado (0,999). Na compensação apenas dos desequilíbrios, houve aumento no fator de potência e uma redução de 97% na potência de desequilíbrio, em relação ao valor sem compensação, sendo que as demais potências praticamente não se alteraram. Durante a compensação exclusiva de reativos o fator de

potência também aumentou, e houve uma redução de 92% na potência reativa em relação ao valor sem compensação (tabela 5.6). Estes resultados mostram que a compensação seletiva de distúrbios é viável e que as parcelas de potência apresentam ortogonalidade entre si, permitindo estudar a melhor escolha da(s) parcela(s) a ser(em) compensada(s).

## 5.5 – Quinto Caso: Carga Não Linear Equilibrada

Para esta simulação será utilizada uma carga equilibrada de natureza não linear. Este comportamento pode ser obtido através de um retificador trifásico acionando um resistor em paralelo com um capacitor. A figura 5.19 ilustra a carga não linear utilizada na simulação.

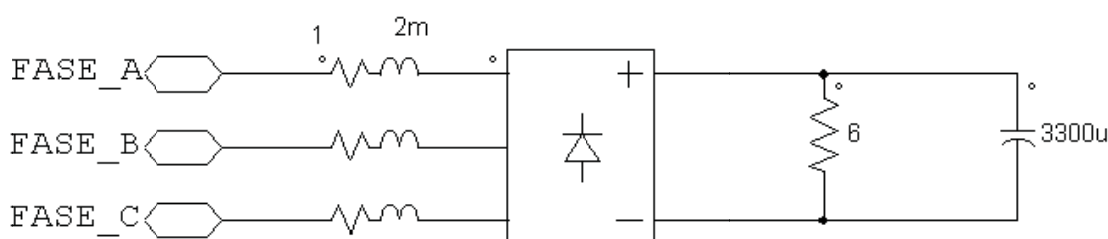


Figura 5.19: Carga Não Linear equilibrada

Realizando a simulação desta carga, pode-se observar que as correntes totais nas fases apresentam distorções, ou seja, não são senoidais, como ilustra a figura 5.20. No gráfico superior estão exibidas as formas de onda das correntes totais por fase e no gráfico inferior, as respectivas tensões de fase.

Aplicando a teoria CPT, as correntes totais podem ser decompostas nas parcelas Ativa (balanceada e desbalanceada), Reativa (balanceada e desbalanceada) e Residual, como mostrado na figura 5.21.

Como pode observar as parcelas referentes às componentes desbalanceadas são desprezíveis (da ordem de mili-ampères), pois não existe desequilíbrio na carga. A diferença é que agora a parcela residual passou a apresentar valores significativos. Realizando a decomposição em termos de potência, obtêm-se os resultados apresentados na tabela 5.8.

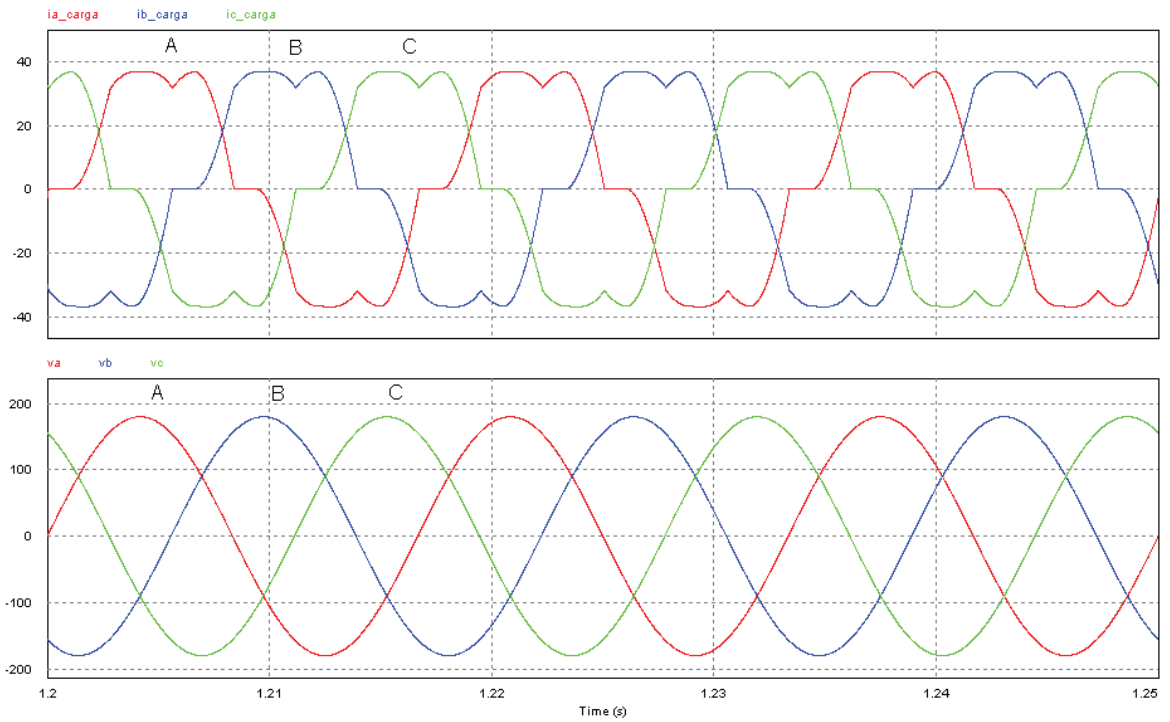


Figura 5.20: Correntes totais em cada fase (superior) para uma carga não linear e respectivas tensões de fase (inferior)

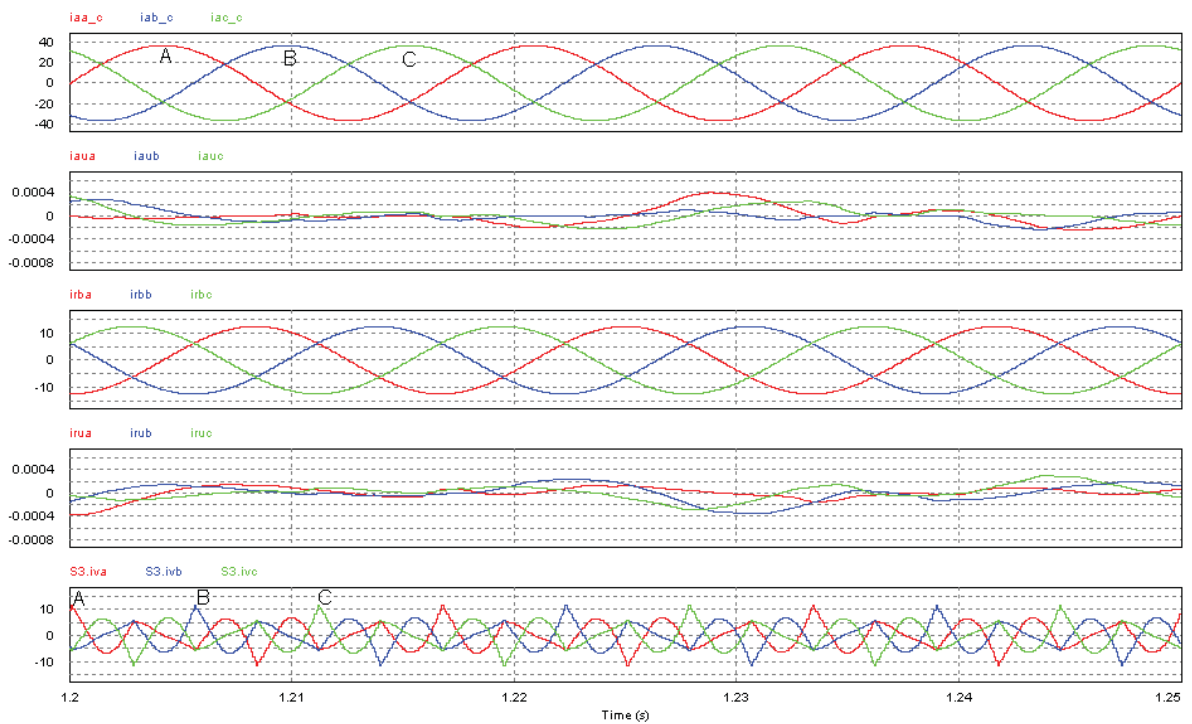


Figura 5.21: Decomposição das correntes pela CPT. De cima para baixo: ativas balanceadas, ativas desbalanceadas, reativas balanceadas, reativas desbalanceadas e residuais.

Tabela 5.8: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga Não Linear equilibrada.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	10,590 [kVA]
Potência Ativa (P)	9,895 [kW]
Potência Reativa (Q)	3,349 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,048 [VA]
Potência de Distorção (V)	1,734 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,934
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	36,9 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $di_{carga}/dt$ )	36,7 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	17,4 [A]

Neste caso novamente existe a possibilidade de compensação total dos distúrbios, assim como uma compensação seletiva: reativos ou distorção (parcela residual).

Configurando o filtro ativo para a compensação **total** dos distúrbios, têm-se as formas de onda de corrente mostradas na figura 5.22. No gráfico superior estão exibidas as correntes compensadas nas fases do gerador e no gráfico inferior, as respectivas tensões de fase. É possível perceber que as correntes possuem a mesma amplitude e estão em fase com as respectivas tensões, o que comprova a compensação dos reativos. Outro fato é que as distorções também foram eliminadas.

Configurando, agora, o FAP para compensar apenas os **reativos**, obtém-se as formas de onda exibidas na figura 5.23. Como se pode observar, as correntes, embora distorcidas (pois não foi compensada a componente residual) estão em fase com as tensões, caracterizando a compensação de reativos.

A próxima configuração para o filtro ativo consiste em compensar as **distorções** das correntes (ou seja, compensando as componentes residuais). A figura 5.24 exhibe as formas de onda das correntes no gerador para uma compensação exclusiva das parcelas residuais (gráfico superior) e as respectivas tensões de fase (gráfico inferior). Como se pode observar, as distorções foram compensadas, porém as correntes não estão em fase com as tensões.

Aplicando a teoria CPT, em cada uma das compensações realizadas, chega-se aos valores de potência expressos na tabela 5.9. Como se pode observar pelos valores da tabela 5.9, a compensação total dos distúrbios elevou o Fator de Potência para muito

próximo da unidade (0,999) e reduziu muito as demais parcelas de potência (94% nos reativos e 74% na residual, em relação a tabela 5.8. Já a compensação apenas de reativos, promoveu uma redução de 95% de reativos, em relação a tabela 5.8, e praticamente não alterou as demais parcelas. Na compensação apenas das distorções, a redução na parcela residual foi de 73%, em relação a tabela 5.8, sendo que as demais praticamente não se alteraram. Isto mostra, mais uma vez, a viabilidade da compensação seletiva de distúrbios e comprova a ortogonalidade das parcelas de potência da CPT.

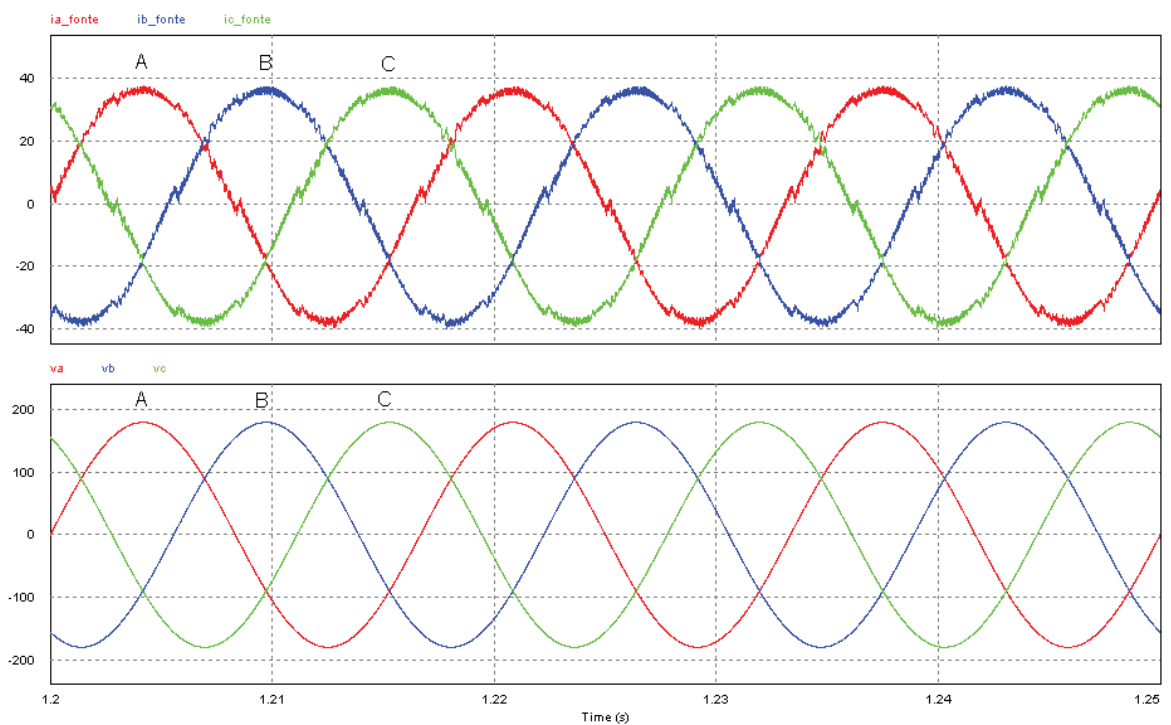


Figura 5.22: Corrente nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior), para uma compensação total dos distúrbios.

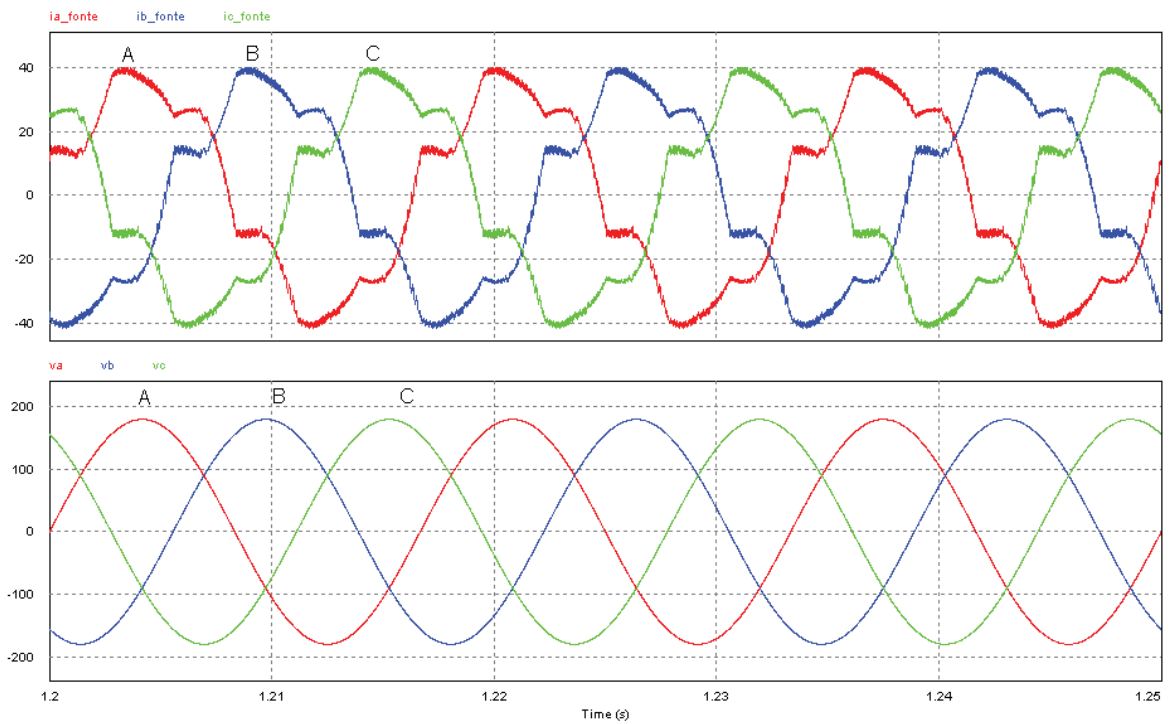


Figura 5.23: Corrente nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior), para uma compensação dos distúrbios de reativos.

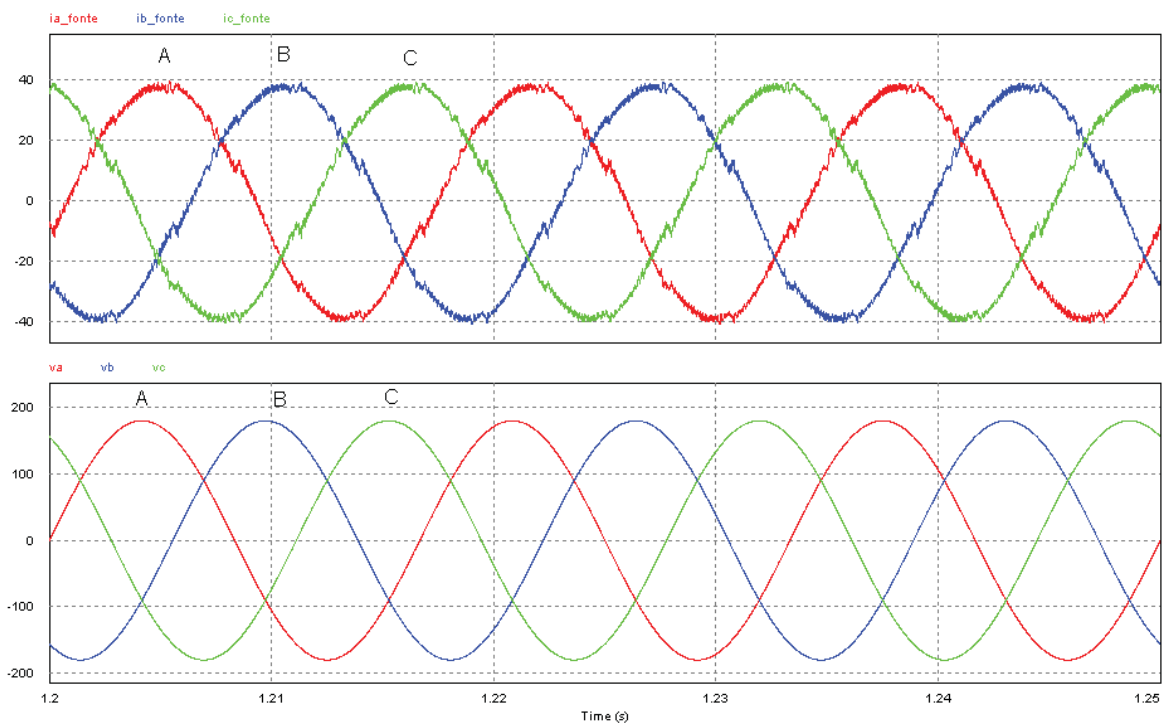


Figura 5.24: Corrente nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior), para uma compensação de distorções (componentes residuais).

Tabela 5.9: Valores de potência calculados pela CPT – Carga Não Linear equilibrada após o FAP.

Parâmetro Medido	Sem Compens.	Tipo de Compensação		
		Total	Reativos	Distorções
Potência Aparente (A)	10,590 [kVA]	9,978 [kVA]	10,096 [kVA]	10,380 [kVA]
Potência Ativa (P)	9,895 [kW]	9,966 [kW]	9,941 [kW]	9,878 [kW]
Potência Reativa (Q)	3,349 [kVA]	0,195 [kVA]	0,188 [kVA]	3,153 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	0,048 [VA]	0,024 [VA]	0,029 [VA]	0,008 [VA]
Potência de Distorção (V)	1,734 [kVA]	0,449 [kVA]	1,755 [kVA]	0,466 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,934	0,999	0,985	0,952
Corrente Eficaz do FAP ( $I_{F\_RMS}$ )		10,5 [A]	9,4 [A]	4,9 [A]

## 5.6 – Sexto Caso: Carga Não Linear Desequilibrada

Este caso trata de uma configuração mais genérica de carga, com uma associação de componentes não lineares junto com elementos resistivos e armazenadores de energia (indutores e capacitores). A figura 5.25 exibe a configuração da carga simulada. É interessante observar que, nesta carga, ocorrem todos os efeitos discutidos nos casos anteriores permitindo, assim, uma melhor avaliação da teoria CPT.

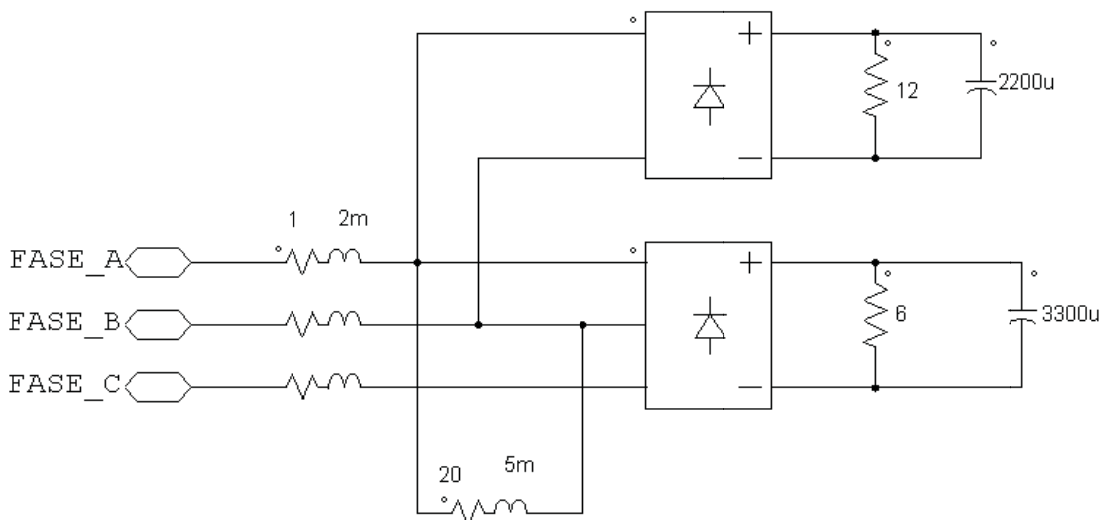


Figura 5.25: Carga não linear desequilibrada.

Simulando esta carga, obtêm-se as correntes totais de fase mostradas na figura 5.26. No gráfico superior são exibidas as correntes totais por fase e no gráfico inferior as respectivas tensões de fase. Observa-se que as correntes estão desequilibradas (amplitudes diferentes) e apresentam distorções.

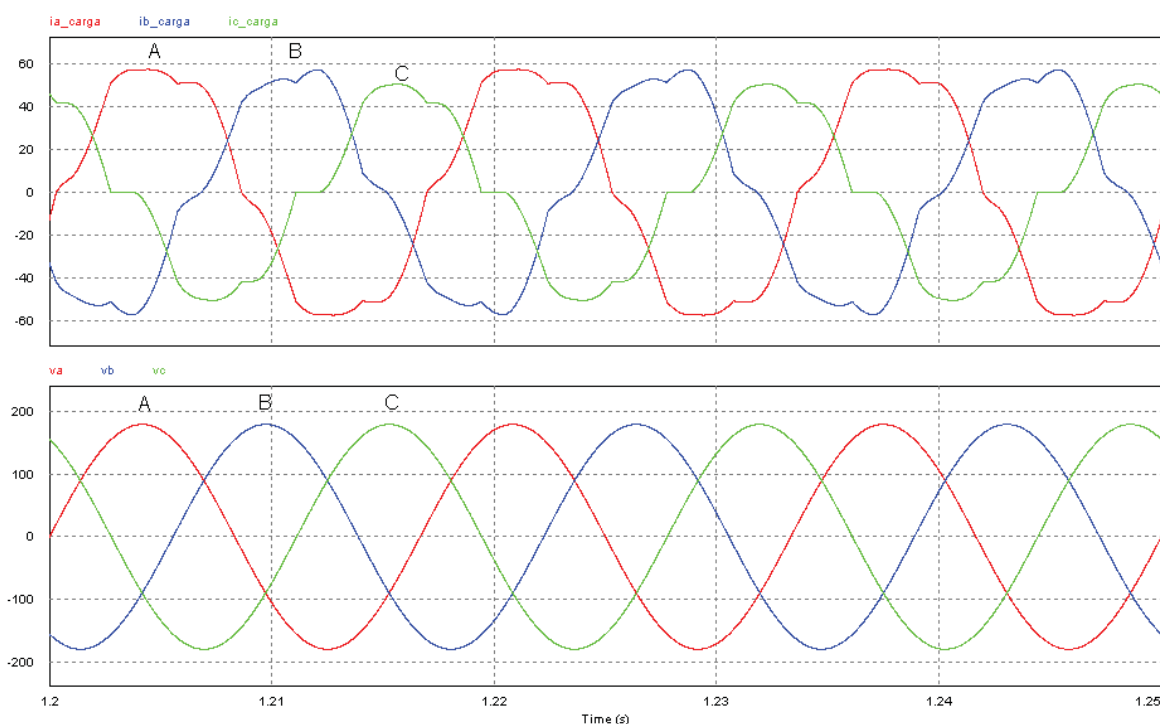


Figura 5.26: Correntes totais nas fases (superior) e respectivas tensões de fase (inferior) para uma carga não linear desequilibrada.

Aplicando a teoria CPT, é possível decompor as correntes totais em parcelas Ativa (balanceada e desbalanceada), Reativa (balanceada e desbalanceada) e Residual, como mostrado na figura 5.27. Como se pode observar, todas as componentes apresentam valores expressivos. A partir das definições das parcelas de potência da CPT, obtêm-se os valores mostrados na tabela 5.10. Pode-se observar que todas as componentes apresentam valores expressivos, necessitando de compensação.

Ajustando o filtro ativo para a compensação de **todos** os distúrbios, obtêm-se as formas de corrente mostradas na figura 5.28. Como se pode observar, todas correntes apresentam a mesma amplitude, estão em fase com as respectivas tensões e não apresentam distorção.

Configurando o FAP para compensar apenas os **reativos**, têm-se as formas de onda das correntes das fases mostradas na figura 5.29. Observa-se que as correntes têm amplitudes diferentes, apresentam distorção, porém acompanham as respectivas tensões.

Configurando o FAP para compensar apenas os **desequilíbrios**, têm-se as formas de onda das correntes das fases mostradas na figura 5.30. Observa-se que as correntes apresentam praticamente as mesmas amplitudes, porém continuam distorcidas e um pouco defasadas em relação às tensões de fase.

Configurando o FAP para compensar apenas as **distorções** da carga, obtêm-se as formas de onda apresentadas na figura 5.31. Observa-se que as correntes possuem amplitudes diferentes, estão ligeiramente defasadas em relação às tensões, porém, não apresentam distorções.

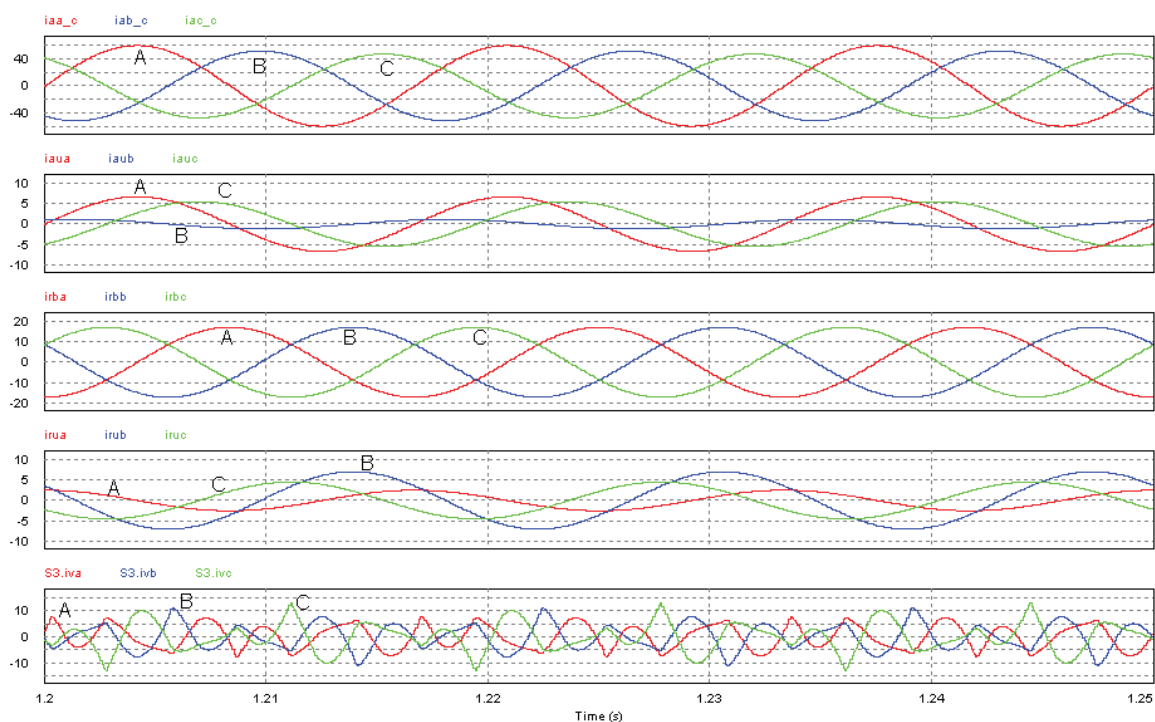


Figura 5.27: Decomposição das correntes totais. De cima para baixo: Ativa balanceada, Ativa desbalanceada, Reativa Balanceada, Reativa desbalanceada, e Residual.

Tabela 5.10: Valores de potência calculados com base na CPT – Carga Não Linear desequilibrada.

Parâmetro Medido	Valor
Potência Aparente (A)	15,151 [kVA]
Potência Ativa (P)	14,173 [kW]
Potência Reativa (Q)	4,650 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	1,932 [kVA]
Potência de Distorção (V)	1,825 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,935b
Corrente Máxima na carga ( $I_{carga\_max}$ )	57,3 [A]
Máxima derivada de corrente na Carga ( $di_{carga}/dt$ )	40,7 [kA/s]
Corrente Não Ativa máxima ( $I_{na\_max}$ )	28,6 [A]

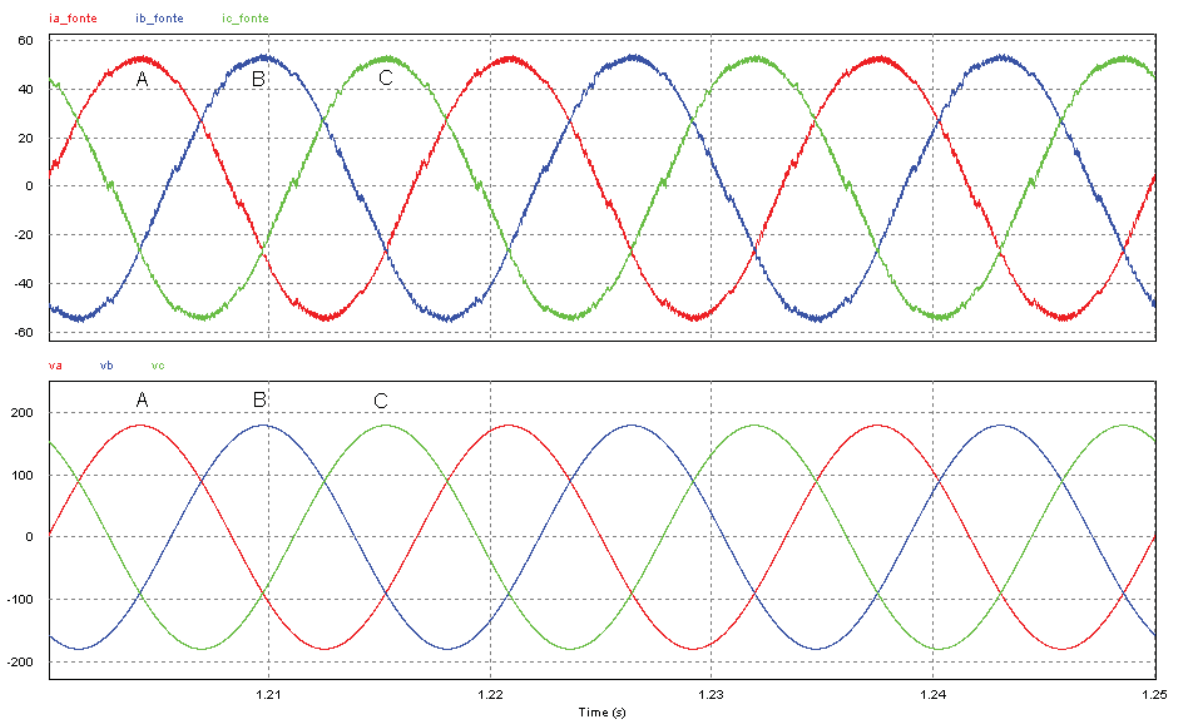


Figura 5.28: Correntes totais nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação **total** dos distúrbios de uma carga não linear desequilibrada.

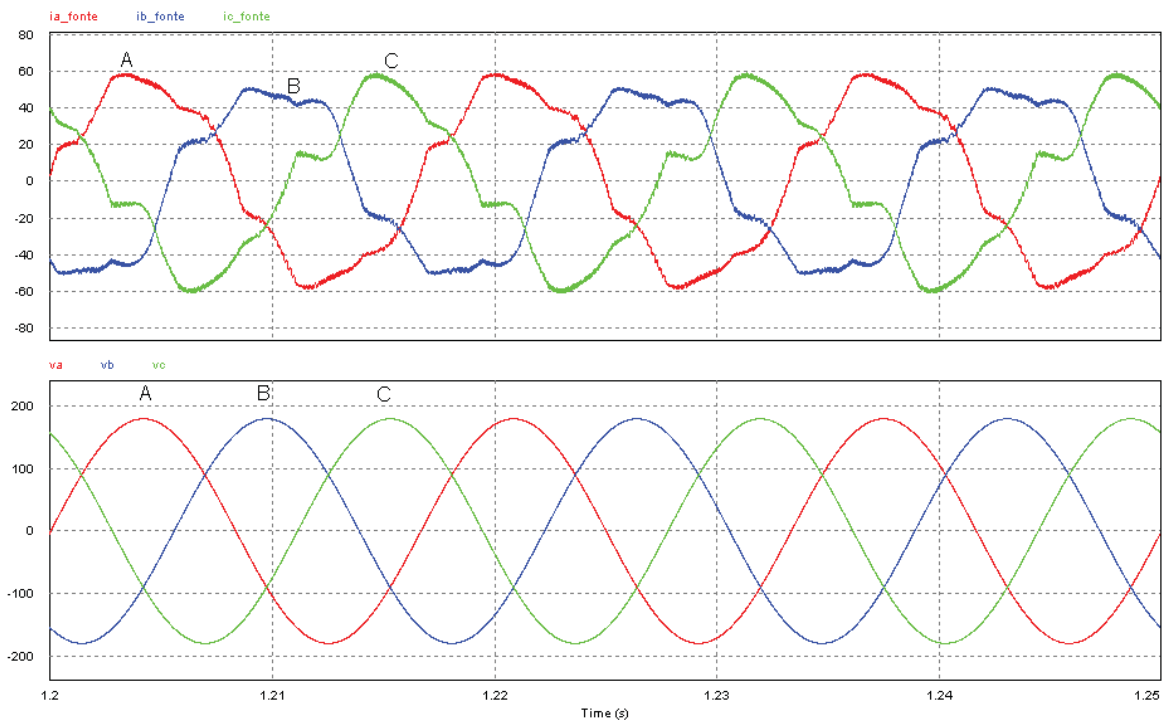


Figura 5.29: Correntes totais nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação dos **reativos** de uma carga não linear desequilibrada.

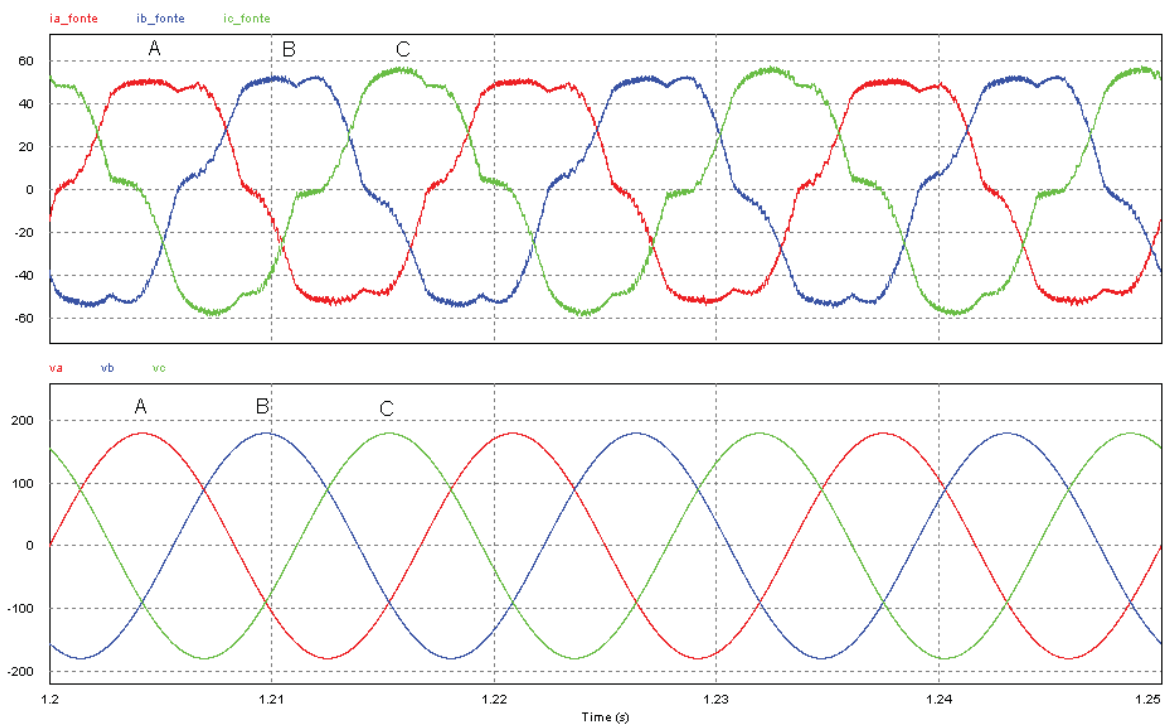


Figura 5.30: Correntes totais nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação dos **desequilíbrios** de uma carga não linear desequilibrada.

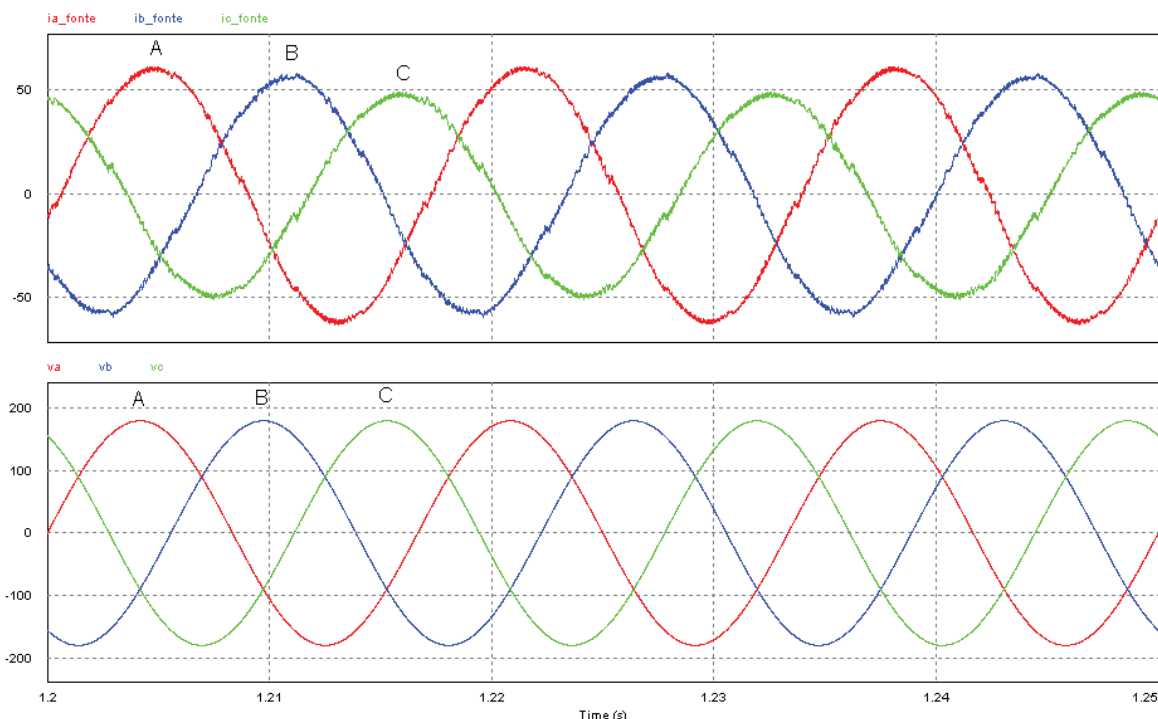


Figura 5.31: Correntes totais nas fases do gerador (superior) e as respectivas tensões de fase (inferior) para uma compensação das **distorções** de uma carga não linear desequilibrada.

A partir das componentes de potência da teoria CPT, obtêm-se os resultados exibidos na tabela 5.11, os quais mostram as parcelas de potência da CPT em cada uma das compensações efetuadas.

Tabela 5.11: Valores calculados pela CPT – Carga Não Linear desequilibrada após o FAP.

Parâmetro Medido	Sem Compens.	Tipo de Compensação			
		Total	Reativos	Deseq.	Distorções
Potência Aparente (A)	15,151 [kVA]	14,370 [kVA]	14,571 [kVA]	14,931 [kVA]	14,957 [kVA]
Potência Ativa (P)	14,173 [kW]	14,363 [kW]	14,284 [kW]	14,133 [kW]	14,141 [kW]
Potência Reativa (Q)	4,650 [kVA]	0,200 [kVA]	0,070 [kVA]	4,447 [kVA]	4,456 [kVA]
Potência de Desequilíbrio (N)	1,932 [kVA]	0,060 [VA]	1,804 [kVA]	0,056 [kVA]	1,920 [kVA]
Potência de Distorção (V)	1,825 [kVA]	0,418 [kVA]	2,240 [kVA]	1,848 [kVA]	0,446 [kVA]
Fator de Potência ( $\lambda$ )	0,935	0,999	0,980	0,947	0,945
Corrente Eficaz do FAP ( $I_{F\_RMS}$ )	-	18,4 [A]	15,7 [A]	5,6 [A]	5,5 [A]

Para finalizar as comparações tem-se, na figura 5.32, um gráfico em forma de barras mostrando as parcelas de potências Ativa (P), Reativa (Q), Desequilíbrio (N) e Distorção (V), para cada tipo de compensação efetuada.

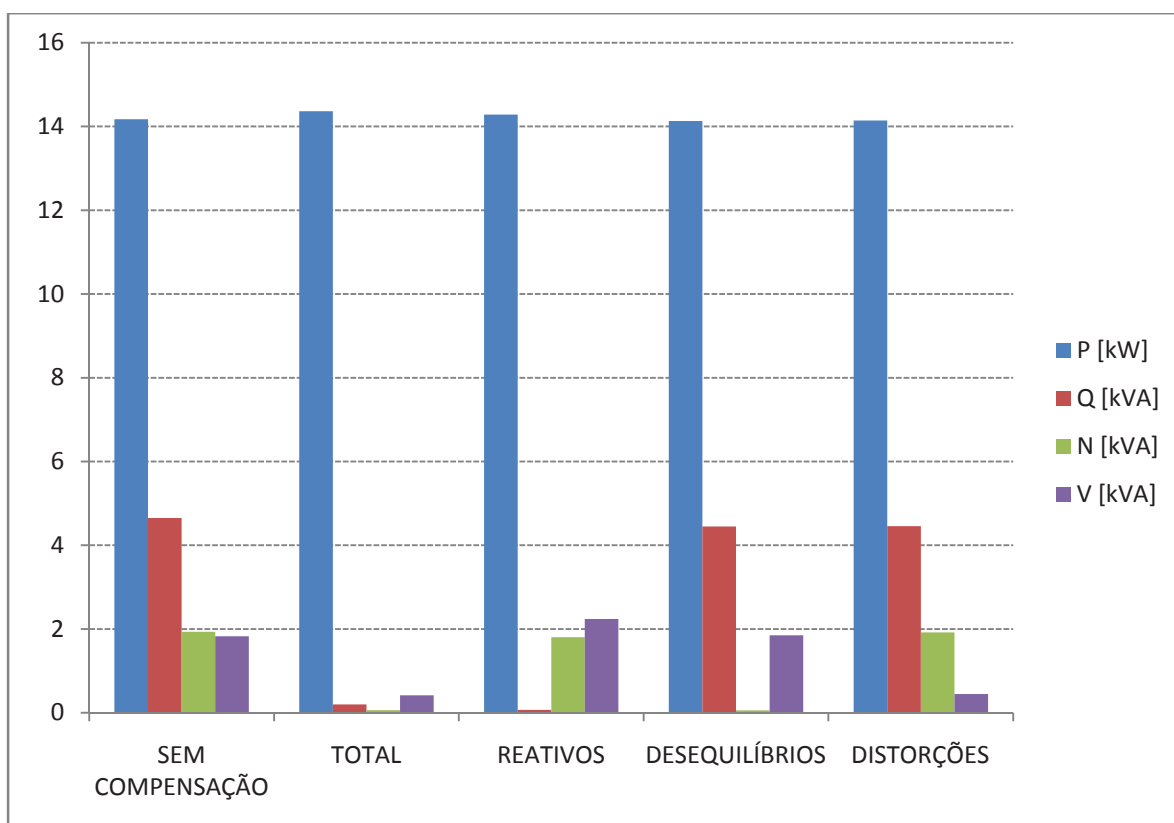


Figura 5.32: Gráfico comparativo das parcelas de potência da CPT, para uma carga não linear desequilibrada, nas situações: sem compensação, compensação total, compensação de reativos, compensação de desequilíbrios e compensação de distorções.

## 5.7 – Cálculo dos Elementos do Filtro Ativo Paralelo

Para realizar o cálculo dos elementos do FAP serão utilizadas as equações apresentadas no Capítulo IV junto com os resultados de simulação obtidos durante a análise da sexta configuração da carga, realizada através da CPT. Optou-se em utilizar esta configuração como base para o projeto porque, dentre as demais, é a que apresenta maior variedade de distúrbios e permite realizar um estudo mais detalhado da operação seletiva do filtro ativo paralelo.

Na tabela 5.12 estão apresentadas as especificações de projeto considerando, novamente, uma futura implementação prática nas instalações disponíveis no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI/UNESP).

Tabela 5.12: Especificações de projeto

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Tensão de fase eficaz da rede elétrica	$V_{rede\_ef}$	127	V
Tensão no barramento CC	$V_{CC}$	400	V
Porcentagem de ondulação da corrente no indutor	$\Delta i_{LF}$	10	%
Porcentagem de ondulação da tensão do barramento CC	$\Delta V_{CC}$	10	%
Frequência da rede	$f_{rede}$	60	Hz
Frequência de chaveamento dos transistores	$f_s$	12600	Hz
Máxima corrente da carga	$I_{carga\_max}$	57,3	A
Máxima derivada de corrente na carga	$dI_{carga\_max}/dt$	40,7	kA/s
Máxima corrente não ativa na carga	$I_{na\_max}$	28,6	A
Potência Reativa da carga (decomposição CPT)	Q	4650	VA
Potência de Desequilíbrio da carga (decomposição CPT)	N	1932	VA
Potência de Distorção da carga (decomposição CPT)	V	1825	VA

### 5.7.1 – Cálculo do indutor de saída

Utilizando a equação exibida em (4.5), obtém-se a máxima ondulação de corrente no indutor, como mostra (5.1).

$$\Delta I_{LF_{MAX}} = \Delta i_{LF} \cdot I_{na\_max} = 0,1 \cdot 28,6 = 2,86A \quad (5.1)$$

Por meio do resultado de (5.1) e utilizando a equação exibida em (4.1), obtém-se a indutância do indutor de saída do filtro ativo paralelo, como mostra (5.2).

$$L_F = \frac{0,25 \cdot V_{CC}}{2 \cdot f_s \cdot \Delta I_{LF_{MAX}}} = \frac{0,25 \cdot 400}{2 \cdot 12600 \cdot 2,86} = 1,388mH \approx 1,5mH \quad (5.2)$$

Através da expressão (4.6) determina-se a reatância do indutor, como mostra (5.3).

$$X_{L_F} = 2\pi \cdot f_{rede} \cdot L_f = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} = 0,565 \Omega \quad (5.3)$$

Utilizando a expressão (4.7), determina-se a resistência série do indutor, como mostra (5.4).

$$R_F = 0,1 \cdot X_{L_F} = 0,1 \cdot 0,565 = 0,057 \Omega \quad (5.4)$$

Através da expressão (4.8), é possível terminar a derivada de corrente no indutor. Considerando a menor derivada, que ocorre para  $\theta = 90^\circ$ , obtém-se o valor mostrado em (5.5).

$$\frac{dI_F}{dt} = \frac{+V_{CC} - \sqrt{2} \cdot V_{rede\_ef} \cdot \text{sen}(\theta)}{L_F} = \frac{400 - \sqrt{2} \cdot 127 \cdot \text{sen}(90)}{1,5 \cdot 10^{-3}} \approx 147kA/s \quad (5.5)$$

Percebe-se, pelo valor calculado, que o indutor suporta a dinâmica da carga, pois a menor derivada de corrente do indutor é maior que a derivada de corrente na carga.

### 5.7.2 – Cálculo do capacitor do barramento CC

Considerando a compensação de todos os distúrbios da carga, a potência manipulada pelo filtro ativo paralelo pode ser expressa através de (4.12). Substituindo os dados de projeto, obtém-se o valor mostrado em (5.6).

$$Q_{FILTRO} = \sqrt{Q^2 + N^2 + V^2} = \sqrt{4650^2 + 1932^2 + 1825^2} = 5366 \text{Var} \quad (5.6)$$

A tensão máxima e mínima do barramento CC são dadas por (4.10) e (4.11). Substituindo os dados de projeto, obtêm-se os valores mostrados em (5.7) e (5.8).

$$V_{CCMAX} = V_{CC} \cdot \left(1 + \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) = 400 \cdot \left(1 + \frac{0,1}{2}\right) = 420 \text{V} \quad (5.7)$$

$$V_{CCMIN} = V_{CC} \cdot \left(1 - \frac{\Delta V_{CC}}{2}\right) = 400 \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2}\right) = 380 \text{V} \quad (5.8)$$

A partir da expressão (4.9), e utilizando os valores calculados em (5.6), (5.7) e (5.8), obtém-se o valor do capacitor mostrado em (5.9).

$$C_F = \frac{Q_{FILTRO}}{f_{rede} \cdot (V_{CCMAX}^2 - V_{CCMIN}^2)} = \frac{5366}{60 \cdot (420^2 - 380^2)} = 2795 \mu\text{F} \approx 2800 \mu\text{F} \quad (5.9)$$

### 5.7.3 – Cálculo do ganho do transdutor de corrente da carga

Por meio da expressão (4.13) e utilizando os dados de projeto, encontra-se o ganho do transdutor de corrente como mostrado em (5.10).

$$K_{IL} = \frac{1}{I_{carga\_max}} = \frac{1}{57,3} \approx \frac{1}{100} \quad (5.10)$$

### 5.7.4 – Cálculo do ganho do transdutor de corrente do filtro

Por meio da expressão (4.14) e utilizando os dados de projeto, encontra-se o ganho do transdutor de corrente como mostrado em (5.11).

$$K_{IF} = \frac{1}{I_{na\_max}} = \frac{1}{28,6} \approx \frac{1}{50} \quad (5.11)$$

### 5.7.5 – Cálculo do ganho do transdutor de tensão da rede

Através da expressão exibida em (4.15), obtém-se o ganho do transdutor de tensão da rede, mostrado em (5.12).

$$K_{VCA} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot V_{rede\_ef}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 127} = \frac{1}{180} \approx \frac{1}{250} \quad (5.12)$$

### 5.7.6 – Cálculo do ganho do transdutor de tensão do barramento CC

Partindo da expressão (4.16) e utilizando os dados de projeto, chega-se ao ganho do transdutor de tensão do barramento CC mostrado em (5.13).

$$K_{VCC} = \frac{1}{V_{CCMAX}} = \frac{1}{420} \approx \frac{1}{500} \quad (5.13)$$

### 5.7.7 – Cálculo dos ganhos dos controladores da malha de tensão

Através da expressão (2.1), obtém-se o valor do ganho do retificador, como mostrado em (5.14).

$$K_{CC} = 3 \cdot \frac{(V_{rede\_ef})^2}{V_{CC}} = 3 \cdot \frac{(127)^2}{400} = 120,97 \approx 121 \quad (5.14)$$

A frequência natural do sistema em malha aberta é dada pela expressão (2.4), cujo valor calculado está mostrado em (5.15).

$$\omega_{SC} = \frac{K_{CC} \cdot K_{VCC}}{C_F} = \frac{121 \cdot 1/500}{2800 \cdot 10^{-6}} = 86,43 \text{ rad/s} \approx 87 \text{ rad/s} \quad (5.15)$$

Assumindo uma frequência natural de 10 Hz e uma margem de fase de 60°, os ganhos dos controladores das malhas de tensão do filtro ativo paralelo podem ser calculados a partir das expressões (2.5) e (2.6), cujo resultado está mostrado em (5.16) e (5.17).

$$K_{PCC} = \frac{\omega_{CC}}{\omega_{SC}} = \frac{2\pi \cdot f_{CC}}{\omega_{SC}} = \frac{2\pi \cdot 10}{87} = 0,772 \approx 0,8 \quad (5.16)$$

$$K_{ICC} = \frac{K_{PCC} \cdot \omega_{CC}}{\text{tg}(m_f)} \cdot T_a = \frac{K_{PCC} \cdot 2\pi \cdot f_{CC}}{\text{tg}(m_f)} \cdot \frac{1}{f_s} = \frac{0,8 \cdot 2\pi \cdot 10}{\text{tg}(60^\circ) \cdot 12600} = 2,303 \cdot 10^{-3} \quad (5.17)$$

### 5.7.8 – Cálculo dos ganhos dos controladores da malha de corrente

A partir da expressão (2.7), determina-se o ganho do conversor PWM, como mostrado em (5.18).

$$K_{PWM} = V_{CC} = 400 \quad (5.18)$$

Da mesma forma como foi feito no cálculo dos ganhos dos controladores da malha de tensão, a frequência natural do sistema em malha aberta é obtida a partir da expressão (2.9), de onde se pode escrever a expressão (5.19).

$$\omega_{SC} = \frac{K_{PWM} \cdot K_{IF}}{L_F} = \frac{400 \cdot 1/50}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 5333 \text{ rad/s} \quad (5.19)$$

Assumindo uma frequência natural de 1/6 da frequência de chaveamento, ou seja, 2100 Hz e uma margem de fase de 60°, os ganhos dos controladores das malhas de corrente do filtro ativo paralelo podem ser calculados da mesma forma que em (5.16) e em (5.17), como mostrado em (5.20) e (5.21).

$$K_{Pi} = \frac{\omega_{CC}}{\omega_{SC}} = \frac{2\pi \cdot f_{CC}}{\omega_{SC}} = \frac{2\pi \cdot 2100}{5333} \approx 2,47 \quad (5.20)$$

$$K_{Ii} = \frac{K_{PCC} \cdot \omega_{CC}}{\text{tg}(m_f)} \cdot T_a = \frac{K_{Pi} \cdot 2\pi \cdot f_{CC}}{\text{tg}(m_f)} \cdot \frac{1}{f_s} = \frac{2,47 \cdot 2\pi \cdot 2100}{\text{tg}(60^\circ) \cdot 12600} = 1,49 \quad (5.21)$$

Na tabela 5.12 estão resumidos todos os valores encontrados para os elementos do filtro ativo paralelo.

Tabela 5.12: Valores calculados para os elementos do filtro ativo paralelo

Descrição	Símbolo	Valor	Unidade
Indutor de saída	$L_F$	1,5	mH
Capacitor do barramento CC	$C_F$	2800	$\mu\text{F}$
Ganho do transdutor de corrente da carga	$K_{IL}$	1/100	-
Ganho do transdutor de corrente do filtro	$K_{IF}$	1/50	-
Ganho do transdutor de tensão da rede	$K_{VCA}$	1/250	-
Ganho do transdutor de tensão do barramento CCe	$K_{VCC}$	1/500	-
Ganho Proporcional da Malha de Tensão	$K_{PCC}$	0,8	-
Ganho Integral da Malha de Tensão	$K_{ICC}$	$2,303 \cdot 10^{-3}$	-
Ganho Proporcional da Malha de Corrente	$K_{Pi}$	2,47	-
Ganho Integral da Malha de Corrente	$K_{Ii}$	1,49	-

# Capítulo VI

## Conclusão

O objetivo deste trabalho foi estudar a aplicação da teoria de potência conservativa na compensação de distúrbios de corrente em instalações elétricas. Para isso desenvolveu-se uma metodologia de projeto e controle para filtros ativos paralelo baseada nas parcelas de corrente e potência da CPT. Inicialmente, fez-se a análise da carga através da CPT, onde são obtidos os parâmetros para o projeto do filtro ativo paralelo, e em seguida realizou-se a simulação e análise de desempenho do filtro.

Diante dos resultados das simulações apresentadas no Capítulo V, percebe-se que a aplicação da teoria CPT no controle do filtro ativo paralelo é muito versátil, pois permite escolher pontualmente o distúrbio a ser compensado. Também foi verificada a ortogonalidade das parcelas de corrente e potências da CPT, uma vez que a compensação de uma determinada parcela de potência não provoca alteração significativa nas demais parcelas caracterizando, assim, uma compensação seletiva de distúrbios.

Outra questão importante relaciona-se com a redução da corrente eficaz do conversor do filtro ativo paralelo, em função do tipo de distúrbio escolhido para compensação. Em determinados casos, foi possível elevar consideravelmente o fator de potência global, sem a necessidade de compensar todos os distúrbios da carga, permitindo uma redução significativa na corrente eficaz do filtro ativo. Com isso, o impacto financeiro da aquisição/implementação de um filtro ativo pode ser reduzido, bastando estudar qual a melhor estratégia de compensação seletiva que atenda as necessidades do consumidor.

Também vale destacar a questão relativa à definição de fator de potência global da CPT, em contraste com a definição convencional. Observou-se que o valor de referência adotado tradicionalmente (0,92 no Brasil) deveria ser revisto detalhadamente se o fator de potência for influenciado pelas não linearidades e desbalanços de circuitos polifásicos.

## Propostas para futuros trabalhos

Diante dos resultados obtidos, propõem-se os seguintes temas para trabalhos:

- Estimativas de custo do filtro ativo baseadas na compensação seletiva dos distúrbios;
- Estudos utilizando outras topologias de filtros ativos paralelos;
- Estudos com tensões distorcidas e/ou desequilibradas;
- Aplicações de outras técnicas de controle das malhas de corrente e tensão do filtro ativo paralelo;
- Estudos relativos à definição de um valor de referência para o fator de potência global definido pela CPT.

## Referências Bibliográficas

- [1] Oleskovicz, M. "Qualidade da Energia Elétrica". Apostila. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: < <http://pt.scribd.com/doc/37598019/Qualidade-de-Energia-Mario-Oleskovicz> >. Acesso em: 29 ago. 2011.
- [2] International Electrotechnical Commission. IEC 61000-3-2. "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current  $\leq 16$  A per phase)", Edition 3.0, 2005.
- [3] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Std 519-1992. "IEEE Recommended Practice for Harmonic Control in Electrical Power Systems", 1992.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST)". Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica, 2007.
- [5] Deckmann, S. M.; Pomílio, J. A. "Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica". Apostila de Pós-Graduação, UNICAMP, 2010. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html>>. Acesso em 29 ago. 2011.
- [6] Dugan, R. C.; Mcgranaghan, M. F.; Beaty, H. W. "Electrical Power Systems Quality". McGraw Hill, New York, Second Edition, 2000.
- [7] Bollen, M. H. J. "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags And Interruptions". Power Engineering. IEEE Press, 2000.
- [8] Deckmann, S. M.; Melo, E. F. "On-line Evaluation of Voltage Quality Indexes for Harmonic Distortion, Flicker and Sequence Components," in *IEEE Proceedings of the 1998 International Conference on Harmonics and Quality of Power*, pp. 549-554, 1998.
- [9] Singh, B., Al-Haddad, K.; Chandra, A. "A Review of Active Filters for Power Quality Improvement" *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, vol. 46, No. 5, pp. 960-971, October 1999.
- [10] Peng, F. Z. "Application Issues of Active Power Filters" *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 4, No. 5, pp. 21-30, 1998.
- [11] Marafão, F. P.; Deckmann, S. M.; Pomilio, J. A.; Machado, R. Q. "Selective Disturbing Compensation and Comparisons of Active Filtering Strategies", *IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power*, Rio de Janeiro, Brasil, vol. 2, pp. 484-489, October 2002.
- [12] Negreti, J. F. "Estudos Comparativos de Algumas Arquiteturas de Filtros Ativos de Potência". Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2008.
- [13] Emadi, A.; Nasiri, A.; Bekiarov, S. B. "Uninterruptible Power Supplies and Active Filters". Illinois Institute of Technology. CRC Press, 2005.
- [14] Karve, S. "Three of a Kind". *IEE*. March 2000, pp. 27-31.

- [15] Paredes, H. K. M.; Marafão, F. P.; Terrazas, T. M.; Serni, P. J. A. "Harmonic, Reactive and Unbalance Compensation by Means of CPT Framework", Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Bonito, Brasil, pp. 741-748, 2009.
- [16] Brandão, D. I.; Arbex, C. J. N.; Paredes, H. K. M.; Gonçalves, F. A. S.; Marafão, F. P. "Operação Seletiva de filtros ativos paralelos com base na Teoria de Potência Conservativa", Conferência Brasileira sobre Qualidade da Energia Elétrica, Cuiabá, Brasil, 2011.
- [17] Peng, F. Z. "Harmonic Sources and Filtering Approaches". IEEE Industry Applications Magazine, pp. 18-25, July/August, 2001.
- [18] Felini, M. P. "Estudo e Implementação de um Filtro Ativo Paralelo Monofásico de 8kVA". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, fevereiro, 2007.
- [19] Rodriguez, P.; Pindado, R.; Bergas, J. "Alternative Topology for Three-Phase Four-Wire PWM Converter Applied to a Shunt Active Power Filter". 0-7803-7474-6/02. IEEE, 2002.
- [20] Segura, A. N.; Aguilar, G. M. "Four-Branched-Inverter-Based-Active-Filter for Unbalanced 3-Phase 4-Wires Electrical Distribution Systems". 0-7803-6404-x/00. IEEE, 2000.
- [21] Lindeke, D. "Projeto de um Filtro Ativo Paralelo de 1kVA Usando Técnicas de Controle Analógico e Digital". Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, fevereiro, 2003.
- [22] Marafão, F. P. "Análise e Controle de Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais". Tese de Doutorado, UNICAMP, dezembro, 2004.
- [23] Ogata, K. "Engenharia de Controle Moderno". 4ª Edição, São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- [24] Akagi, H.; Nabae, A. "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage Source PWM Converters", IEEE Transactions on Industrial Application, vol. IA-22, no. 3, pp. 460-465, 1986.
- [25] Penello, L. F.; Watanabe, E. H. "Filtro ativo de potência tipo shunt com seleção da potência a ser compensada". Sba Controle & Automação, vol. 04, no.1, pp.31-37, 1993.
- [26] Cavallini, A.; Montanari, G. C. "Compensation Strategies for Shunt Active-Filter Control", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 9, no. 6, pp. 587-593, 1994.
- [27] Akagi, H. "Control strategy and site selection of a shunt active filter for damping of harmonic propagation in power distribution systems", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 354-363, 1997.
- [28] Aredes, M.; Häfner, J.; Heumann, K. "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 12, no. 2, pp. 311-318, 1997.
- [29] Mattavelli, P.; Marafão, F.P. "Repetitive-Based Control for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 51, no. 05, pp. 1018-1024, 2004.
- [30] Zuniga, T. E. N.; Pomilio, J. A. "Shunt Active Power Filter Synthesizing Resistive Load", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 17, no. 2, pp. 273-278, 2002.
- [31] Fryze, S. "Active and apparent power in circuits with nonsinusoidal voltage and current". Przegł. Elektrotech, 1932.

- [32] Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A. "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits". International Power Electronics Conference, pp. 1375-1386, Tokyo, Japan, 1983.
- [33] Depenbrock, M. "Investigations of the voltage and power conditions at converters without energy storage". Phd Thesis. Technical University of Hannover, Hannover, Germany, 1962.
- [34] Tenti, P. e Mattavelli, P. "A Time-Domain Approach to Power Term Definitions under Non-sinusoidal Conditions". International Workshop on Power Definitions and Measurements under Non-Sinusoidal Conditions, Milano, Itália, pp. 1-10, 2003.
- [35] Tedeschi, E.; Tenti, P. "Cooperative Design and Control of Distributed Harmonic and Reactive Compensators". IEEE International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, Lagow, Polônia, vol. 1, pp. 1-6, 2008.
- [36] Tedeschi, E.; Tenti, P.; Mattavelli, P.; Trombetti, D. "Cooperative control of electronic power processors in micro-grids". Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, Bonito, Brasil, pp. 1-8, 2009.
- [37] Tenti, P.; Mattavelli, P.; Paredes, H. K. M. "Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids". Przegląd Elektrotechniczny, nº 6, pp. 30-37, 2010.
- [38] Paredes, H. K. M. "Teoria de Potência Conservativa: uma nova abordagem para o controle cooperativo de condicionadores de energia e considerações sobre atribuição de responsabilidades". Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas, março, 2011.
- [39] PSIM versão 8.0.7. Powersim Inc. (<http://www.powersimtech.com>).
- [40] Visual Studio 2008. Microsoft Corporation. (<http://www.microsoft.com/portugal/msdn/visualstudio08/default.aspx>).