

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL BIANCHI BREVILHERI

**FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO MONOFÁSICO COM MÉTODO DE
CONTROLE SIMPLIFICADO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

RAFAEL BIANCHI BREVILHERI

**FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA PARALELO MONOFÁSICO COM MÉTODO DE
CONTROLE SIMPLIFICADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Augusto Modesto

CORNÉLIO PROCÓPIO
2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Rafael Bianchi Brevilheri

Filtro ativo de potência paralelo monofásico com método de controle simplificado

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 15:50hs do dia 19/11/2018 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Rodrigo Augusto Modesto - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Vander Teixeira Prado - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Augusto Modesto, pela sabedoria e experiência com que me guiou neste trabalho.

Aos meus colegas de curso que sempre fizeram parte desta caminhada.

À minha família, pois acredito que sem o apoio deles seria muito difícil vencer esse desafio, principalmente minha tia Maria Elizabete que me ajudou sempre que necessário durante todos os anos do curso.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

BREVILHERI, R. B. **Filtro Ativo Paralelo Monofásico com Método de Controle Simplificado**. 2018. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

Este trabalho apresenta o estudo e projeto de um filtro ativo de potência paralelo monofásico (FAP), que são equipamentos utilizados na supressão das correntes harmônicas e compensação de reativos, colaborando com a melhoria da qualidade de energia elétrica. Nesse FAP é aplicada uma estratégia de controle simplificado que gera a corrente de referência. O estudo realizado expõe uma proposta de alterar a malha de controle de tensão, adicionando um filtro passa baixas nessa estrutura para atenuar oscilações no barramento CC do inversor de tensão, possibilitando o aumento da velocidade da ação de controle dessa malha, resultando em uma melhor resposta dinâmica do FAP. Análise computacional e resultados de simulação são mostrados de forma a validar essa melhor dinâmica do filtro ativo, tornando seu comportamento dinâmico durante transitórios de carga equivalente às estratégias de controle convencional.

Palavras-chave: Filtros ativos. Qualidade de energia. Harmônicos. Cargas não-lineares.

ABSTRACT

BREVILHERI, R. B. **Single-phase Parallel Active Filter with Simplified Control Method**. 2018. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

This work presents the study and project of a single-phase parallel active filter, which is an equipment used to compensate the load harmonic currents, collaborating in the improvement of the power quality. An strategy of simplified control, which generates the reference current, is applied to this active filter. The study exposes a proposal to alterate the voltage loop control, through the addition of a low-pass filter in this structure to attenuate oscillations in the dc-bus of the voltage source inverter, enabling the increase of the speed of the control action of the voltage loop, resulting in a better dynamic response. Computational analysis and simulation results are demonstrated in order to validate the improvement in the dynamics of the active filter, making its dynamic behavior equivalent to the strategies of convencional control during the load transients.

Keywords: Active power filter. Power quality. Harmonics. Non-linear loads.

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CC	Corrente Contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
FAP	Filtro Ativo de Potência
FMM	Filtro Média Móvel
FPB	Filtro Passa Baixa
FT	Função Transferência
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional Integral
PLL	Pulse Locked Loop
PWM	Pulse Width Modulation
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SRF	Synchronous Reference Frame
STF	Self Tuning Filter
UPS	Uninterruptible Power Supply

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Retificador monofásico não-controlado a diodos em ponte.....	16
Figura 2	Retificadores com filtro capacitivo e indutivo.....	17
Figura 3	Corrente com retificador monofásico com carga capacitiva.....	17
Figura 4	Corrente com retificador monofásico com carga indutiva.....	18
Figura 5	Espectro harmônico retificador com carga capacitiva.....	18
Figura 6	Espectro harmônico retificador com carga indutiva.....	19
Figura 7	Sistema elétrico com FAP conectado.....	22
Figura 8	Inversor de tensão (VSI) monofásico em ponte completa.....	23
Figura 9	Inversor monofásico em ponte com tensão V_{cc} no barramento	26
Figura 10	Tensão V_{AB} no inversor monofásico em ponte, para modulação a 3 níveis.....	27
Figura 11	Aproximação do sistema inversor e rede, em um circuito elétrico simples.....	28
Figura 12	FAP com método de controle convencional.....	31
Figura 13	Diagrama de blocos do método SRF aplicado em sistema monofásico.....	33
Figura 14	Diagrama do FAP com método de controle simplificado.....	35
Figura 15	Diagrama de blocos do STF-pPLL.....	37
Figura 16	Malha de tensão proposta com FPB 1ª ordem.....	38
Figura 17	Circuito RL no domínio da Frequência.....	38
Figura 18	Diagrama de Bode do filtro passa baixa 1ª ordem.....	40
Figura 19	Diagrama de Bode de $H_v(s)$	41
Figura 20	Diagrama de blocos do Filtro Média Móvel.....	42
Figura 21	Diagrama de Bode do FMM.....	43
Figura 22	Malha de tensão proposta com FMM.....	43
Figura 23	Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado sem filtro.....	47
Figura 24	Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	47
Figura 25	Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado com FMM.....	48
Figura 26	Resposta ao degrau do controle simplificado sem filtro.....	49
Figura 27	Resposta ao degrau do controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	50
Figura 28	Resposta ao degrau do controle simplificado com FMM.....	50
Figura 29	Configuração da carga utilizada na simulação.....	53
Figura 30	Corrente da carga simulada.....	54
Figura 31	Corrente da carga entre 0 e 0,4 segundos.....	55

Figura 32	Espectro da corrente da carga entre 0 e 0,4 segundos.....	55
Figura 33	Corrente da carga entre 0,4 e 0,8 segundos.....	56
Figura 34	Espectro da corrente da carga entre 0,4 e 0,8 segundos.....	56
Figura 35	Corrente da carga entre 0,8 e 1,2 segundos.....	57
Figura 36	Espectro da corrente da carga entre 0,8 e 1,2 segundos.....	57
Figura 37	Simulação da estrutura física do conversor (a) para controle convencional e (b) para controle simplificado.....	58
Figura 38	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.....	59
Figura 39	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	59
Figura 40	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.....	60
Figura 41	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	60
Figura 42	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.....	61
Figura 43	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	62
Figura 44	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.....	62
Figura 45	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	63
Figura 46	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.....	64
Figura 47	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	64
Figura 48	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.....	65
Figura 49	Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	65
Figura 50	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.....	67
Figura 51	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	68

Figura 52	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.	69
Figura 53	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	69
Figura 54	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.	70
Figura 55	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	70
Figura 56	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.	71
Figura 57	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	71
Figura 58	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.	72
Figura 59	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.....	72
Figura 60	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.	73
Figura 61	Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	13
2	DISTORÇÕES HARMÔNICAS E FORMAS DE FILTRAGEM.....	15
2.1	Harmônicos.....	15
2.1.1	Equipamentos Geradores de Harmônicos.....	16
2.1.2	Recomendações e Requisitos para Controle de Harmônicos IEEE Std. 519-1992.....	19
2.1.3	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8.....	20
2.2	Filtros Ativos de Potência Paralelo.....	21
2.2.1	Funcionamento do FAP.....	21
2.2.2	Circuitos Inversores para Operação de Filtros Ativos.....	22
2.3	Modelagem do Filtro Ativo Paralelo Monofásico.....	23
2.3.1	Modelo Matemático da Malha de Tensão.....	25
2.3.2	Modelo Matemático da Malha de Corrente.....	27
2.3.3	Projeto dos Controladores.....	29
2.4	Controle de Filtro Ativo de Potência.....	31
2.4.1	Controle Convencional (Com <i>Feed-Forward</i> de corrente).....	31
2.4.1.1	Método Baseado no SRF aplicado individualmente em cada fase.....	32
2.4.2	Controle Simplificado.....	33
2.4.2.1	Sistema de sincronismo (PLL).....	36
2.4.2.2	Controle Simplificado Com Filtro de Primeira Ordem.....	37
2.4.2.3	Controle Simplificado Com Filtro de Média Móvel.....	41
2.4.3	Resposta em Operação da Malha de Tensão do Controle Simplificado.....	44
2.4.4	Considerações do capítulo.....	52
3	RESULTADOS DE SIMULAÇÕES.....	53
3.1	Formas de onda: corrente e tensão da rede e tensão do barramento CC.....	58
4	CONCLUSÕES.....	75
	REFERÊNCIAS.....	77

1 INTRODUÇÃO

Nos dias de hoje, com o desenvolvimento tecnológico, cada vez mais preocupa-se com a qualidade de energia do sistema elétrico. Com essa evolução da tecnologia tornou-se mais comum a utilização de equipamentos eletrônicos em diversas aplicações (uso doméstico, comercial e industrial), graças as suas vantagens como melhor eficiência, componentes menores, que por consequência reduzem o peso, além de otimizar processos por serem dispositivos controláveis (AKAGI, 1996; BRAGA, 2017). Porém muitos destes equipamentos são construídos com interruptores semicondutores de potência, controlados ou não, por exemplo retificador a diodos, que drenam correntes não-senoidais do sistema elétrico, distorcendo as correntes e tensões da rede, devido as componentes harmônicas geradas por essas cargas não-lineares (MIKKILI; PANDA, 2011; BRAGA, 2017).

Um elevado conteúdo harmônico de corrente pode distorcer as tensões no ponto de acoplamento comum (PAC), que por consequência conduz uma série de problemas, tais como baixo fator de potência, vibrações em motores e geradores, sobreaquecimento dos enrolamentos dos transformadores, explosão de capacitores, falha em sistema de proteção e ressonância harmônica (TEIXEIRA, 2003; LAM; WONG, 2014).

Esses efeitos indesejados precisam ser corrigidos ou minimizados, afim de garantir um melhor funcionamento dos equipamentos elétricos. Existem algumas maneiras de realizar a supressão ou eliminação dessas componentes harmônicas. Uma estratégia clássica é o uso de filtros passivos, sintonizados ou amortecidos, que são formados a partir de diferentes relações entre um circuito R, L e C, com baixo custo em relação a outras metodologias (TEIXEIRA, 2003; REIS et al, 2018). Outro possível método de solução corretiva é o uso de filtros ativos de potência, ligados em série ou paralelo. Esse equipamento funciona como uma fonte de corrente controlada que injeta ou drena corrente da rede, buscando diminuir a taxa de distorção harmônica das correntes fornecidas pela rede elétrica. Além disso, existe a possibilidade de realizar a compensação de energia reativa (ORTMANN; MUSSA, 2008).

Para que os filtros ativos funcionem de maneira correta, é preciso que essa corrente controlada seja calculada. Para isso, existem alguns métodos de compensação ativa de potência que determina a corrente de referência que será

utilizada. A forma de controle mais estudada em literaturas é o baseado na teoria apresentado por (AKAGI; KANAGAWA; NABAE, 1983,1984), chamado de método de compensação pela Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea p-q, aplicada em sistemas trifásicos equilibrado. Baseada nesta primeira teoria é proposto por (Lima; Greenhalgh, 1993) a chamada de Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea Estendida p-q-e, que também foi usada como base para métodos de controle de filtros ativos em sistemas trifásicos. Outra técnica que já é difundida nas literaturas é o método de controle baseado no Sistemas de Eixos de Referência Síncrona (SRF), implementado em um FAP trifásico em (ORTMANN; MUSSA, 2008; MODESTO, 2015).

Os métodos citados passaram a ser mais estudados e assim modificações foram propostas para utilizar essas teorias em sistemas monofásicos. Um deles é o método também baseado no SRF, porém com implementação monofásica proposta em (MODESTO, 2007), onde altera-se a forma de cálculo da referência de modo a aplicar essa estratégia individualmente em cada fase. Também para sistemas monofásicos, a técnica de controle apresentada em (POTTKER, 2004), chamada de controle simplificado, pois é uma estratégia que toma como base o monitoramento da corrente da rede elétrica, diferentemente dos métodos já apresentados que baseiam sua estratégia no monitoramento das correntes da carga e da saída do filtro. Dessa forma, além de reduzir o número de sensores de corrente, a quantidade de cálculos é menor e menos complexa. Contudo, este método mais simples apresenta um desempenho dinâmico inferior que os outros métodos citados, por isso, a justificativa deste trabalho será atuar na estrutura de controle da técnica apresentada por (POTTKER, 2004), para que a resposta deste filtro seja melhorada, buscando um desempenho similar à de outras técnicas mais elaboradas.

1.1 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um filtro ativo de potência paralelo monofásico aplicando o método de controle simplificado. Esse método terá uma proposta de alteração da estrutura de controle de tensão, para melhorar a resposta dinâmica da estratégia de controle simplificada, quando comparada a estratégias de controle convencionais

Este trabalho tem como objetivos específicos os seguintes itens:

- Estudar os problemas que estão relacionados a qualidade de energia;
- Analisar os métodos de soluções corretivas utilizados nos problemas de qualidade de energia;
- Estudar os filtros ativos de potência;
- Formas de compensação de harmônicos e reativos;
- Realizar análise comparativa de um sistema de controle convencional com um sistema simplificado;
- Propor melhoria na resposta dinâmica do sistema simplificado e fazer a modelagem do sistema proposto;
- Realizar simulações com ferramentas computacionais da estrutura física do modelo proposto;
- Comparar as simulações dos métodos de controle simplificado e convencional.

2. DISTORÇÕES HARMÔNICAS E FORMAS DE FILTRAGEM

Nesta seção são apresentados conceitos sobre os harmônicos, além das formas de filtragem, mostrando desde a estrutura básica do FAP, até alguns métodos de controle aplicados.

2.1 Harmônicos

As distorções harmônicas de corrente e tensão são resultados dos efeitos das cargas não-lineares no sistema. Sendo que elas são o somatório das suas componentes na frequência fundamental de múltiplos inteiros, chamados de 3^o, 5^o, 7^o, 9^o, 11^o e assim sucessivamente (Lima; Greenhalgh, 1993).

A ferramenta usada como indicador de harmônicos presentes é chamada de distorção harmônica total (DHT). Este fator pode ser calculado para corrente e tensão, porém ele não demonstra todas os efeitos que essas distorções causam na rede (TEIXEIRA, 2003), essas taxas são calculadas a partir das equações (1) e (2).

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \quad (1)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \quad (2)$$

Onde:

DHT_v – Distorção harmônica total de tensão.

DHT_i – Distorção harmônica total de corrente.

V_h – Valor rms da componente de tensão harmônica h.

V_1 – Valor rms da tensão fundamental.

I_h – Valor rms da componente de corrente harmônica h.

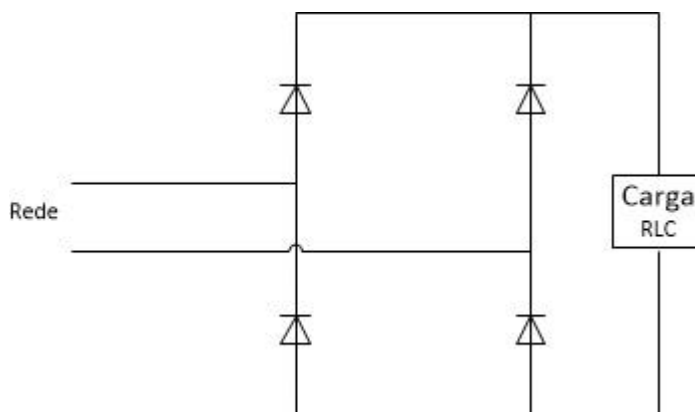
I_1 – Valor rms da corrente fundamental.

2.1.1 Equipamentos Geradores de Harmônicos

As cargas não-lineares que são os principais causadores de distorções harmônicas, tem esse tipo de comportamento devido à forma de corrente drenada de algumas topologias de circuitos de entrada. Circuitos estes projetados com dispositivos semicondutores, no caso de retificadores controlados e não-controlados, conversores de alta potência de vários pulsos, etc. Alguns destes equipamentos são utilizados para o condicionamento da energia gerada através do sistema eólico estudado em (REIS et al, 2018).

O retificador monofásico não-controlado a diodos em ponte é uma das estruturas mais utilizadas em equipamentos eletrônicos domésticos e comerciais, sua topologia básica é mostrada na Figura 1.

Figura 1: Retificador monofásico não-controlado a diodos em ponte.

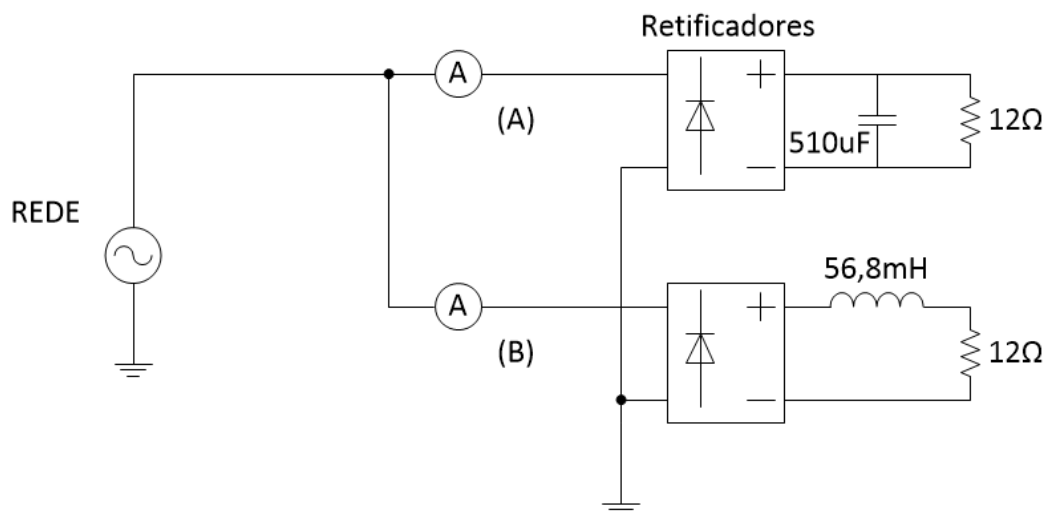


Fonte: Autoria própria.

Devido a ação dos diodos, a forma de onda resultante de um retificador não responderá linearmente a uma alimentação senoidal, assim drenando da rede elétrica correntes com conteúdo harmônico. Porém o nível de DHT varia conforme o uso de filtros capacitivos ou indutivos na constituição do circuito.

Na Figura 2, são mostradas duas topologias de retificadores, com cargas capacitiva e indutiva respectivamente. Assim é possível verificar as distorções causadas por esses dois tipos de cargas não-lineares no sistema de energia elétrica.

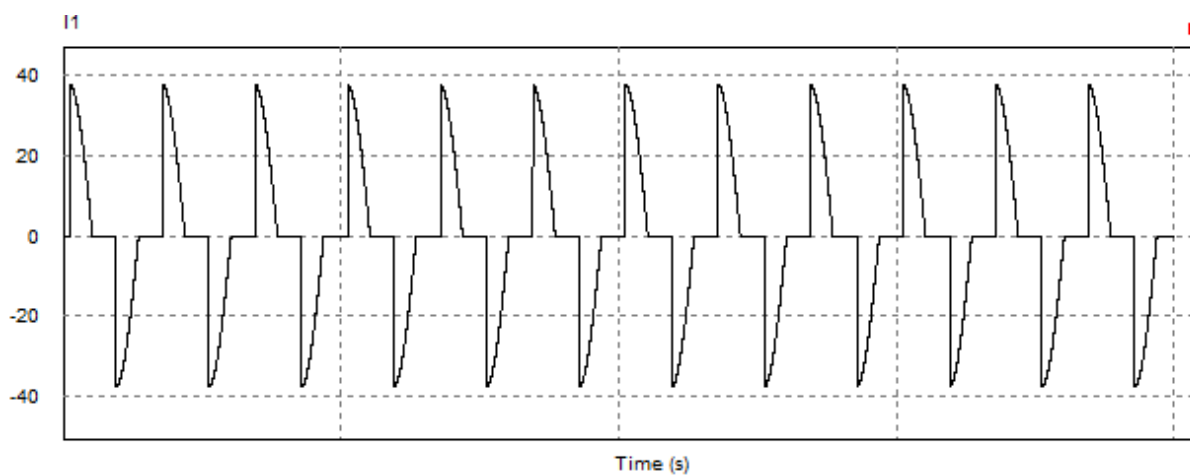
Figura 2: Retificadores com cargas capacitiva e indutiva.



Fonte: Autoria própria.

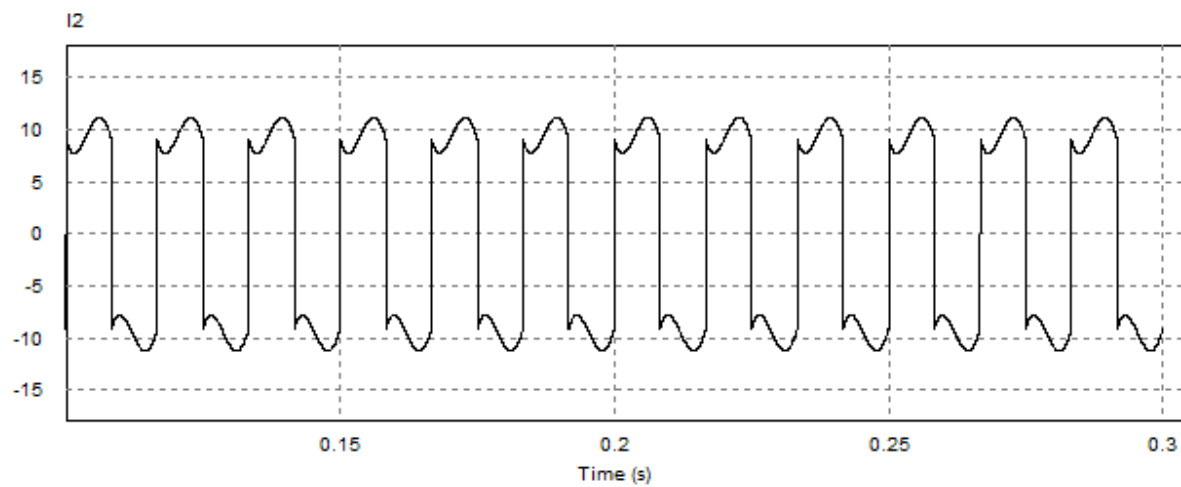
As correntes medidas pelos amperímetros (A) e (B) da Figura 2, são ilustrados pelas Figuras 3 e 4. Em seguida, os respectivos espectros harmônicos de cada uma das configurações dos retificadores são mostrados nas Figuras 5 e 6.

Figura 3: Corrente com retificador monofásico com carga capacitiva.



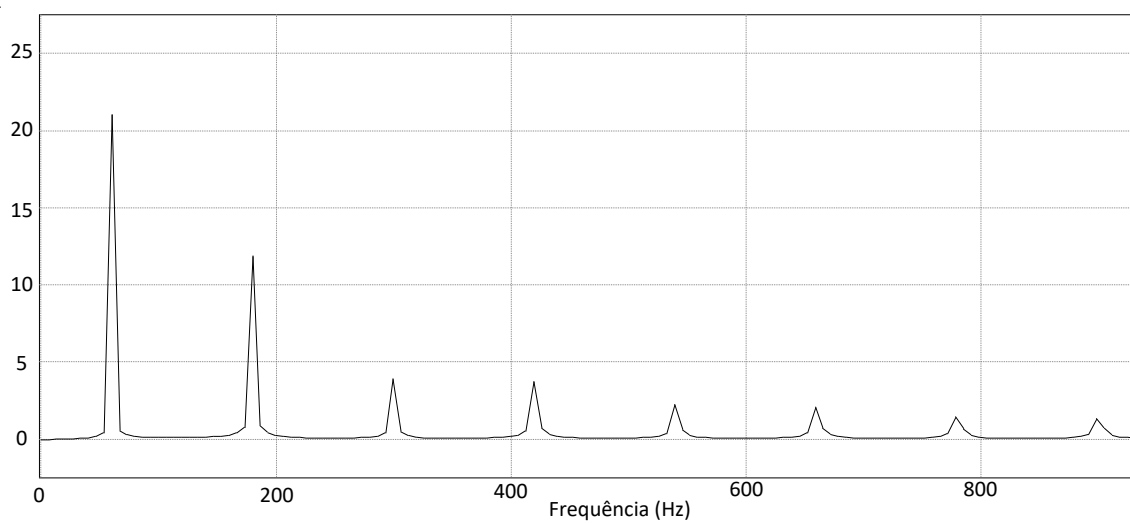
Fonte: Autoria própria.

Figura 4: Corrente com retificador monofásico com carga indutiva.



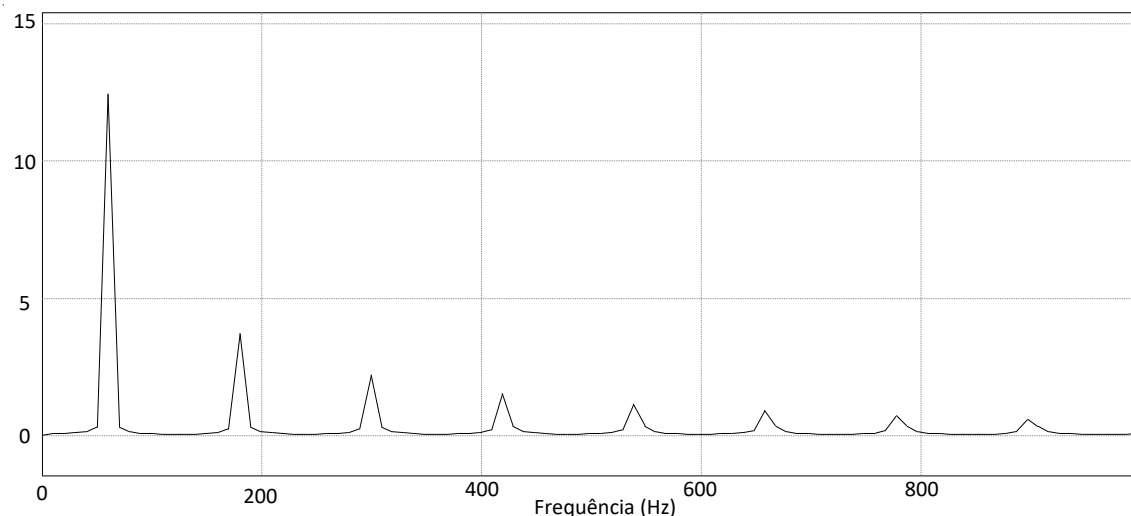
Fonte: Autoria própria.

Figura 5: Espectro harmônico retificador com carga capacitiva.



Fonte: Autoria própria.

Figura 6: Espectro harmônico retificador com carga indutiva.



Fonte: Autoria própria.

Então, pelas Figuras 5 e 6 nota-se que há um grande conteúdo harmônico nos dois tipos de circuitos. Resultando assim em uma forma de onda não senoidal mostrado nas Figuras 3 e 4. Logo os circuitos retificadores mostrados anteriormente apresentam uma alta DHT no sistema com valor respectivo de 68,7% e 44,3%, que distorcem as correntes da rede.

Para que cada vez menos esses efeitos apareçam no sistema de potência, normas internacionais e nacionais buscam regulamentar a geração de harmônicos, definindo limites máximos de distorção permitidos, além de alguns métodos para neutralização destes distúrbios.

2.1.2 Recomendações e Requisitos para Controle de Harmônicos IEEE Std. 519-1992

A norma IEEE traz recomendações para o limite de distorção de corrente e tensão para consumidores individuais. Contudo, o principal foco de análise desses índices de harmônicos é no ponto de acoplamento comum (PAC), ou qualquer outro ponto acessível para o consumidor realizar a medição direta das interferências (IEEE Std. 519, 1992).

A norma também explica que os harmônicos de tensão acontecem em função de harmônicos de corrente. O total de correntes harmônicas injetadas na rede

depende do número de consumidores que injetam as distorções no sistema, mas também amplitude individual de cada um deles. Ou seja, os limites de distorção considerados normais, recomendados por (IEEE Std. 519, 1992), variam de acordo com os níveis de tensão e corrente de curto-circuito do consumidor. Assim, quanto maiores os níveis de correntes de curto-circuito em relação as de carga, maiores serão os limites de distorção admitidos. Já o inverso ocorre quando os níveis de tensão são mais elevados, restringindo a porcentagem aceita.

Além das recomendações feitas, ela também apresenta métodos para o controle de correntes harmônicas. Um deles é o uso de filtros shunt, que são os filtros passivos explicados em (TEIXEIRA, 2003), formado por circuitos L e C série individualmente sintonizados nas frequências das componentes harmônicas presentes no sistema. Outra técnica apresentada é a de injeção de correntes harmônicas. São compensadores adaptáveis que monitoram a corrente de carga e injetam uma corrente igual e oposta a harmônica, para que na soma das correntes elas se cancelem (IEEE Std. 519, 1992). Esse método é o foco deste trabalho, o qual apresentará um filtro ativo que realiza a injeção da corrente de compensação, causando o cancelamento das componentes harmônicas do sistema elétrico.

2.1.3 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Módulo 8

O módulo estabelece procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica, abordando qualidade do produto e do serviço prestado. Diferente das normas internacionais que define por exemplo limites de distorções na corrente, aqui no Brasil, essa norma caracteriza fenômenos relativos a tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, possibilitando que a ANEEL determine os padrões da qualidade de energia elétrica. (PRODIST, módulo 8, 20008)

Os procedimentos relativos a qualidade de energia elétrica, devem ser observados por:

- Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- Produtores de energia;
- Distribuidoras;
- Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;

- Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão – DIT; e
- Operador Nacional do Sistema – ONS.

Os fatores que serão analisados, a fim de garantir a QEE do sistema, em regime permanente ou em transitórios são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios de tensão, flutuação de tensão, variações de tensão de curta duração, variação de frequência. (PRODIST, módulo 8, 2008)

2.2 Filtros Ativos de Potência Paralelo

Nesta seção é estudado o funcionamento dos filtros ativos de potência, bem como a composição da sua estrutura básica. Pode ser dividida em duas partes: os inversores e os métodos de controle, sendo que o último deles será estudado mais a fundo posteriormente neste trabalho.

2.2.1 Funcionamento do FAP

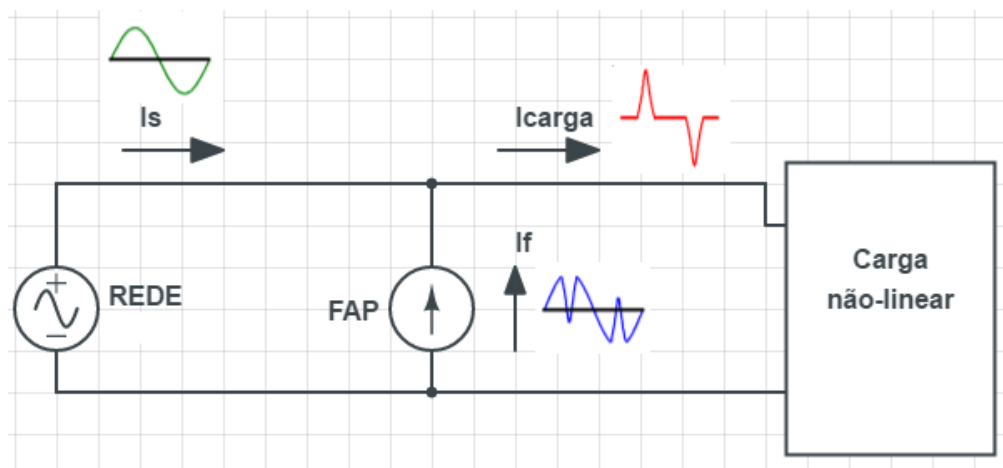
Os filtros ativos paralelos são ligados em paralelo com a rede e a carga. Sua principal ação dentro do sistema é atenuar as componentes harmônicas de corrente, além de fazer a compensação de potência reativa em tempo real, se ajustando a variações de carga da instalação (POTTKER et al, 2004; DE BARROS et al, 2018).

O FAP realiza todas essas funções através da injeção de correntes de compensação, que são de fase oposta, causando atenuação dos harmônicos da rede (CAMPANHOL et al, 2013). Sendo assim, as harmônicas de corrente circulam apenas pelo filtro e pela carga, circulando pela rede apenas a parcela fundamental da corrente da carga, fazendo o conjunto filtro e carga-não linear ter um comportamento de carga resistiva (POTTKER et al, 2004).

Assim pode-se considerar que os FAPs atuam como fontes de correntes, como mostra a Figura 7. Porém essas fontes não fornecem correntes senoidais, isto porque, elas são controladas pelos métodos adequados, que determinarão o tipo e a forma de onda da corrente injetada no sistema.

Analisando a Figura 7, percebe-se que a corrente da rede é igual a corrente da carga (I_{carga}) menos a corrente do filtro (I_f). Assim o filtro fornece a parcela harmônica, podendo também fornecer potência reativa se houver necessidade de compensar reativos, deixando para a rede apenas a parte fundamental da carga (POTTKER et al, 2004), regulando a DHT e o fator de potência da instalação.

Figura 7: Sistema elétrico com FAP conectado.



Fonte: Autoria própria

2.2.2 Circuitos Inversores para Operação de Filtros Ativos

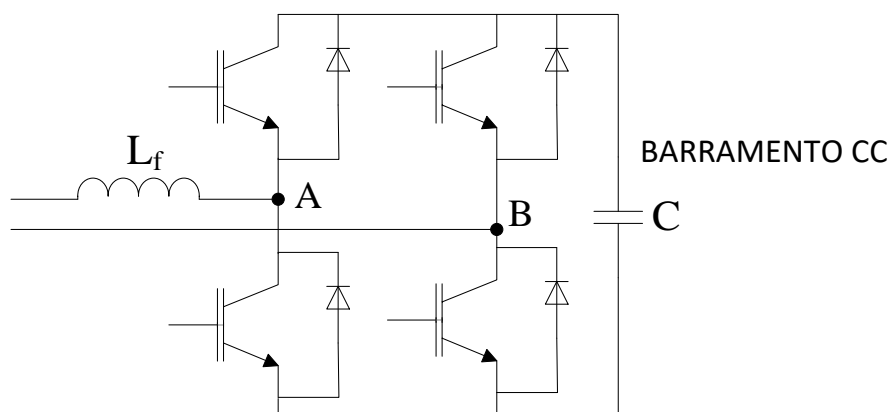
Os inversores bidirecionais em corrente são os elementos que fisicamente geram as correntes de compensação quando implementados como filtros ativos. Ou seja, eles são responsáveis pela injeção dessa corrente para que seja feita a mitigação dos harmônicos.

Esses equipamentos podem ter duas topologias diferentes. Sendo elas características de inversor de tensão (VSI - Voltage Source Inverter) como também de corrente (CSI – Current Source Inverter). A principal diferença entre os dois é que no barramento CC do primeiro é utilizado um capacitor que tem características de fonte de tensão, já no segundo utiliza-se um indutor o qual trabalha como uma fonte de corrente (POTTKER, 2004).

A topologia geralmente utilizada e mais difundida na literatura para aplicações de FAP é a de VSI, pois em relação ao CSI, possui menos perdas em sua operação (POTTKER et al, 2004; FERACIN, 2009). Ainda sobre os inversores de

tensão, podem-se definir tipos diferentes entre eles, como o inversor em meia ponte, ponte completa, com grampeamento do ponto neutro (NPC – neutral point clamped) e a conexão série dos inversores de tensão monofásicos. Em (GHETTI et al., 2010) foi feito o estudo da operação de cada uma dessas topologias, verificando seu desempenho com filtro ativo paralelo. Por isso para este trabalho foi determinado que a montagem em ponte completa (Figura 8) será utilizada, pois permite a utilização de modulação PWM a 3 níveis, o que reduz o indutor na saída do filtro (FENILI, 2007). Considera-se também que não há problemas de desequilíbrios de tensão nos capacitores como na topologia NPC (FEYH, 2007). Além disso, a tensão nas chaves é a mesma do barramento CC, o qual é composto pelo capacitor, facilitando a modelagem da malha de tensão (FERACIN, 2009). Observa-se também que o meia-ponte possui desequilíbrio de tensão que deve ser compensado com uma malha de tensão adicional.

Figura 8: Inversor de tensão (VSI) monofásico em ponte completa.



Fonte: Autoria própria.

2.3 Modelagem do Filtro Ativo Paralelo Monofásico

Para que o filtro entre em operação corretamente é necessário realizar o seu controle. Este é feito por meio de duas malhas, a de tensão e corrente.

Na malha de tensão é preciso manter o valor médio da tensão do capacitor do barramento CC maior que o pico da rede (MODESTO, 2007; POTTKER et al, 2004;

FENILI, 2007), garantindo que o FAP consiga injetar corrente no sistema através do indutor de acoplamento. A modelagem do controle desta malha será feita mais adiante no trabalho.

A malha de corrente depende primordialmente da topologia do inversor utilizado e do tipo de modulação aplicada, pois é ela que, definitivamente, faz a compensação das correntes harmônicas, por isso deve ter resposta rápida para gerar as correntes necessárias (POTTKER, 2004). O controle dela pode ser feito por histerese ou por valores médios instantâneos. Geralmente, o mais utilizado para filtros ativos é o segundo método, pois o controle por histerese é baseado em comparar a corrente da rede com uma corrente de referência senoidal, proporcional e em fase com a tensão da rede, com certa histerese, a partir da qual é gerado os comandos para chavear o inversor (POTTKER, 2000). Nesse método a frequência de chaveamento é variável, o que causa complicações quanto ao projeto dos elementos magnéticos (POTTKER et al, 2004). O número de níveis do inversor é um ponto importante nessa malha, pois afeta tanto a ondulação da corrente de saída, quanto a FT (função transferência) de controle (POTTKER, 2000). Assim, ao utilizar o controlador PI, deve-se preocupar com o posicionamento da frequência de cruzamento de ganho da função em malha aberta, mantendo a entre um quarto e um décimo da frequência de chaveamento (MODESTO, 2007; POTTKER, 2000).

Em (GHETTI et al., 2010), outros métodos de controle de corrente são estudados, como o PI-SRF, que tem como base os mesmos princípios do PI explicado anteriormente, porém como os sinais de referência são tratados no eixo de referência síncrona, os valores calculados são constantes, o que garante um erro em regime estacionário nulo. Técnicas mais complexas que atuam na seleção de harmônicas são mais eficientes no controle da corrente, porém sua implementação fica mais complexa ao passo que haja um maior número de componentes no sistema (GHETTI et al., 2010).

Para este trabalho o tipo de controlador utilizado será um controlador PI, modelo mais usual para este tipo de controle, que será aplicado na malha de corrente e será detalhada nas seções seguintes.

2.3.1 Modelo Matemático da Malha de Tensão

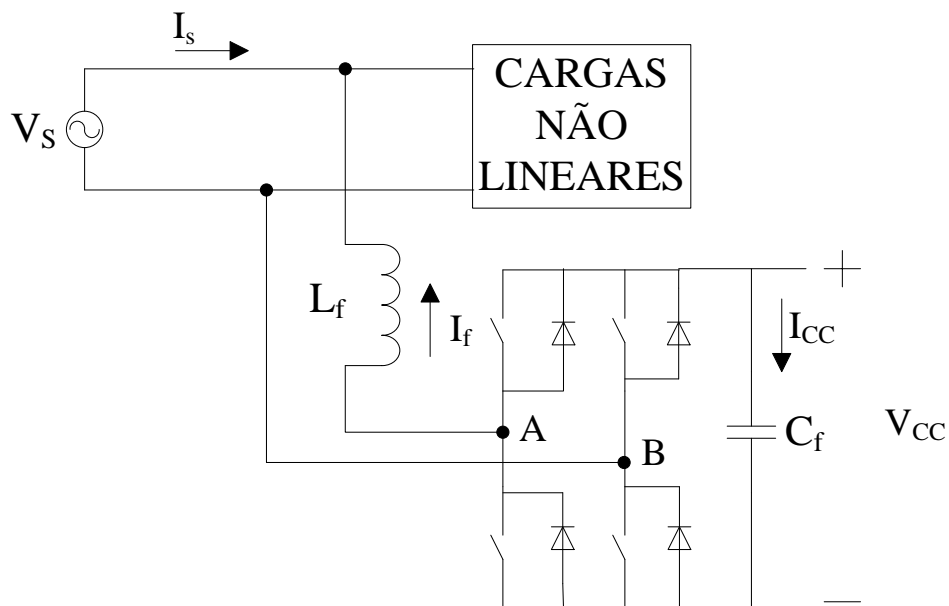
Como explicado anteriormente, nesta malha de controle a intenção é manter a tensão do capacitor do barramento CC constante e maior que o valor de pico da tensão da rede na frequência fundamental, para garantir o sentido da corrente do FAP. Para obter o modelo matemático, foi considerado que a potência ativa média do barramento CC (p_{CC}) é igual potência ativa média que flui entre a rede e o filtro ativo (p_S) (CAMPANHOL et al, 2013). Desconsiderando as perdas de chaveamento do inversor e no indutor L_f .

$$p_S = p_{CC} = V_S * I_S = V_{CC} * I_{CC} \quad (3)$$

Onde V_S e I_S são respectivamente tensão e corrente de rede, V_{CC} e I_{CC} são a tensão e corrente do barramento CC, conforme a Figura 9. Substituindo, na equação (3), a corrente I_{CC} pela equação da corrente no capacitor e realizando as manipulações matemáticas, chegamos na equação não linear.

$$\frac{dV_{CC}}{dt} = \frac{V_S * I_S}{V_{CC} * C_f} \quad (4)$$

Figura 9: Inversor monofásico em ponte com tensão V_{CC} no barramento.



Fonte: Autoria própria.

Em seguida, utiliza-se o modelo de pequenos sinais para encontrar a função que represente o comportamento do barramento CC. Aplica-se esse método pois a variação de tensão no capacitor C_f é pequena, dessa forma tem-se a partir de (4) a seguinte equação.

$$\frac{d[V_{CC} + \delta V_{CC}]}{dt} = \frac{V_S [I_S + \delta I_S]}{C_f * V_{CC}} \quad (5)$$

Substituindo a equação (4) em (5), obtém-se apenas as parcelas das variáveis com os distúrbios aplicados, representado pela equação (6).

$$\frac{d\delta V_{CC}}{dt} = \frac{V_S * \delta I_S}{C_f * V_{CC}} \quad (6)$$

Aplicando a transformada de Laplace, lembrando que $\mathcal{L}[dx/dt] = sX(s)$, passando a equação (6) para o domínio da frequência.

$$s\delta V_{CC}(s) = \frac{V_S * \delta I_S(s)}{C_f * V_{CC}} \quad (7)$$

A função de transferência é obtida a partir da razão entre a variável de saída e entrada do barramento CC. Sendo respectivamente a tensão V_{CC} e a corrente da rede I_S . Assim a FT da malha de tensão $G_V(s)$ é dada pela equação (8).

$$G_V(s) = \frac{\delta V_{CC}(s)}{\delta I_S(s)} = \frac{V_S}{sC_f * V_{CC}} \quad (8)$$

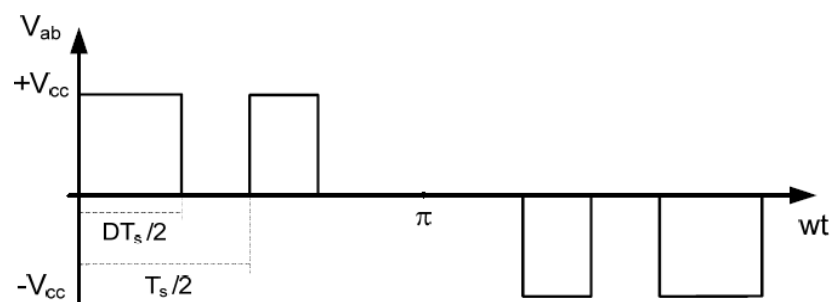
2.3.2 Modelo Matemático da Malha de Corrente

Neste modelo, o método aplicado inicialmente é o de valores médios instantâneos, mesma técnica utilizada em (FENILI, 2007). Deve-se assumir que não há ondulação na tensão do barramento CC, facilitando os cálculos. Além disso considera-se que o inversor da Figura 8 esteja conectado à rede com tensão V_{rede} . A seguir, pelo método pode-se dizer que essa tensão tem valor médio dado por:

$$V_{rede} = V_S \quad (9)$$

A tensão média entre os braços do inversor, no ponto A e B da Figura 8 é calculada a partir do gráfico de tensão da mesma, considerando modulação PWM a 3 níveis.

Figura 10: Tensão V_{AB} no inversor monofásico em ponte, para modulação a 3 níveis.



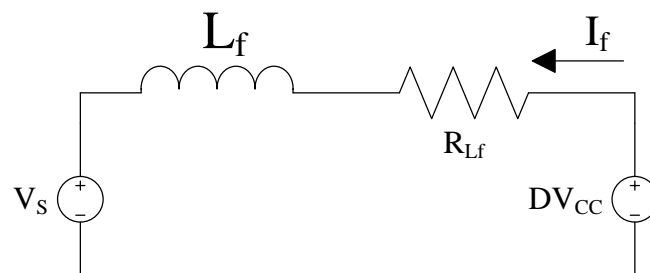
Fonte: FELINI, M. P. 2007.

Considerando o primeiro intervalo de chaveamento da Figura 10, onde $0 \leq \omega t \leq \pi$ e integrando a função dentro deste instante, tem-se o valor médio de V_{AB} .

$$V_{AB} = \frac{1}{T_s/2} * \int_0^{DT_s} V_{CC} dt = DV_{CC} \quad (10)$$

Onde D é a razão cíclica do inversor. A partir de então, com os valores médios determinados pode-se aproximar o sistema da Figura 8 através de um circuito elétrico simples. Tendo que é considerado também que o indutor de acoplamento L_f possui uma resistência interna R_{L_f} , mostrado na Figura 11.

Figura 11: Aproximação do sistema inversor e rede, em um circuito elétrico simples.



Fonte: Autoria própria.

Pelo circuito ilustrado anteriormente é possível obter a FT da malha de corrente. Então, aplicando a lei das Tensões de Kirchhoff tem-se a equação (11) que origina a equação (12):

$$V_s + L_f \frac{dI_f(t)}{dt} + I_f R_{L_f} = D(t) * V_{CC} \quad (11)$$

$$\frac{dI_f(t)}{dt} = \frac{D(t)*V_{CC} - V_s - I_f(t)R_{L_f}}{L_f} \quad (12)$$

Considerando que nas grandezas da equação 12 é aplicado um pequeno distúrbio, tem-se a equação:

$$\frac{d[I_f(t)+\delta I_f(t)]}{dt} = \frac{[D(t)+\delta D(t)]*V_{CC}-V_S-[I_f(t)+\delta I_f(t)]R_{Lf}}{L_f} \quad (13)$$

Substituindo a equação (13) em (14) e fazendo as manipulações matemáticas, a equação se reduz para:

$$\frac{d\delta I_f(t)}{dt} = \frac{\delta D(t)V_{CC}-\delta I_f(t)R_{Lf}}{L_f} \quad (14)$$

Assim utilizando a transformada de Laplace, para análise no domínio da frequência a equação fica:

$$s\delta I_f(s) = \frac{\delta D(s)V_{CC}-\delta I_f(s)R_{Lf}}{L_f} \quad (15)$$

Agora isolando as grandezas do sistema e fazendo o coeficiente entre a corrente do filtro I_f e razão cíclica do inversor, obtém-se na equação (16) a função transferência da malha de corrente $G_I(s)$.

$$G_I(s) = \frac{\delta I_f(s)}{\delta D(s)} = \frac{V_{CC}}{R_f+sL_f} \quad (16)$$

2.3.3 Projeto dos Controladores

Como explicado anteriormente, neste trabalho será utilizado o controlador PI, tanto nas malhas de controle de tensão do barramento CC quanto de controle da corrente. O método para definir seus ganhos é o mesmo aplicado nos dois casos.

O controlador PI tem seu comportamento definido através dos respectivos ganhos, proporcional e integral (K_P e K_I). Essas variáveis são calculadas de modo que, o sistema compensado, em malha aberta, tenha margem de fase e frequência de cruzamento desejadas para o projeto. O método de cálculo dos ganhos do controlador é realizado a partir da resposta em frequência de cada modelo, via diagrama de Bode, como apresentado em (MODESTO, 2015).

Importante salientar que, algumas características que cada valor obtido pelos ganhos, influencia no comportamento do sistema compensado. Por exemplo, a margem de fase é o que afeta a estabilidade e amortecimento. Sendo assim quanto menor o ângulo de fase desejada ϕ_D , menos amortecido será o sistema. Já em termos de tempo de resposta, quanto maior a frequência de cruzamento ω_C , menor será o tempo de resposta, fazendo com que o sistema tenha uma ação mais rápida. (Modesto, 2015)

Para calcular os ganhos K_P e K_I utilizam-se as equações (17) e (18), baseado no diagrama de Bode, respectivamente.

$$K_P = M_c * \cos \phi_c \quad (17)$$

$$K_I = -K_P * \omega_C * \tan \phi_c \quad (18)$$

Onde M_C é o módulo do controlador PI para ω_C escolhido para o sistema e ϕ_c é o ângulo de fase do controlador, para que se obtenha a margem de fase desejada ϕ_D através da equação (19). Onde o ângulo ϕ_c é calculado pela diferença entre o ângulo da planta do modelo em questão ϕ_P somado a 180° , para garantir que o sistema compensado tenha o ângulo desejado na frequência de cruzamento ω_C .

$$\phi_C = \phi_D - (\phi_P + 180) \quad (19)$$

Observa-se que este método de cálculo dos ganhos K_P e K_I , pode ser utilizado tanto para a malha de controle de tensão quanto o de corrente. Verificando apenas os limites de projeto, que variam conforme a planta utilizada. Tais valores serão explicados nas seções seguintes do trabalho.

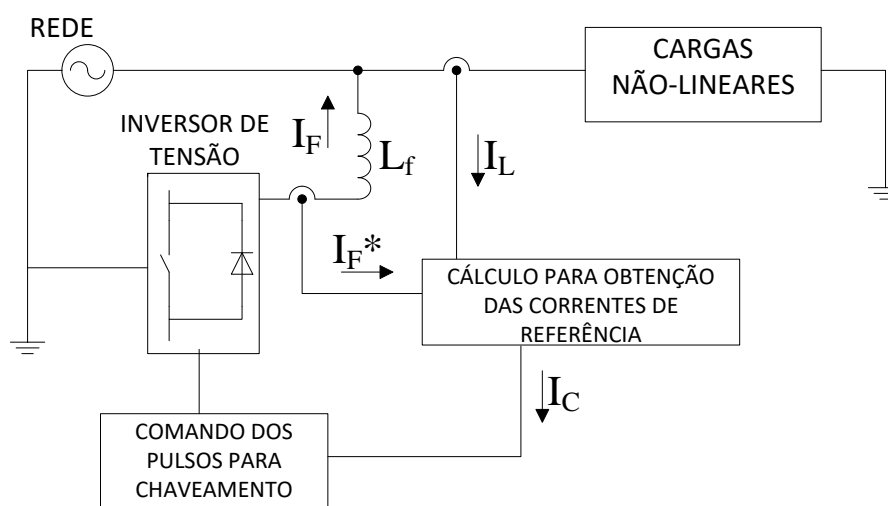
2.4 Controle de Filtro Ativo de Potência

Neste capítulo serão apresentadas algumas formas de controle de filtros, que serão importantes na comparação das metodologias mais usuais e difundidas nas literaturas com o método proposto por este trabalho.

2.4.1 Controle Convencional (Com *Feed-Forward* de corrente)

Uma forma bem difundida na literatura com estudos mais avançados em controle dos FAPs é o controle convencional com feed-forward de corrente. Este método consiste no monitoramento da corrente da carga para que se realizem os cálculos de potência para encontrar as componentes harmônicas e assim obter a corrente de referência do filtro. A Figura 12 mostra de forma genérica essa técnica de controle, que tem o nome de feed-forward pois através da medição da corrente da carga é adiantado para sistema que tipo de corrente aquela carga apresenta.

Figura 12: FAP com método de controle convencional.



Fonte: Autoria própria.

Importante salientar que, para esta forma de controle é necessário também monitorar a corrente de saída do filtro. Afim de garantir que o FAP injete a corrente de compensação calculada pelo algoritmo adequado.

Com esta configuração é possível utilizar variados algoritmos de cálculo das correntes de compensação. Um dos mais estudados nas literaturas é o Método

de Potências Instantâneas p-q e o p-q estendido em (AKAGI; KANAGAWA; NABAE, 1983,1984; Lima; Greenhalgh, 1993). Outros métodos diferentes, geralmente aplicados em sistemas trifásicos é o baseado nos eixos de referência síncrona SRF, implementado em (GHETTI et al., 2012). Também existem trabalhos que propõem utilizar redes neurais para geração da corrente de referência (CAMPANHOL et al., 2011). O modelo convencional também é aplicado em (DE BARROS et al, 2018), que aplica estratégia de filtragem seletiva, baseada no algoritmo FLC (*Fourier Linear Combiner*) compensando componentes harmônicas de cargas balanceadas e desbalanceadas, permitindo que reduza a potência do conversor através da compensação de corrente seletiva.

Todos os métodos citados anteriormente são essencialmente aplicados em sistemas trifásicos, porém como este trabalho é baseado em um sistema monofásico será apresentado um estudo sobre o método convencional baseado no SRF aplicado individualmente em cada fase.

2.4.1.1 Método Baseado no SRF aplicado individualmente em cada fase

Essa técnica consiste em transformar variáveis trifásicas dos eixos estacionário *abc*, em um sistema bifásico de eixos que rotacionam na velocidade síncrona em relação aos vetores nos seus eixos anteriores (MALVEZZI, 2014). Através das transformadas de Clark e Park equação (20,21), as grandezas fundamentais de tensão e corrente são transformadas em grandezas contínuas.

$$\begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \\ I_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{La} \\ I_{Lb} \\ I_{Lc} \end{bmatrix} \quad (20)$$

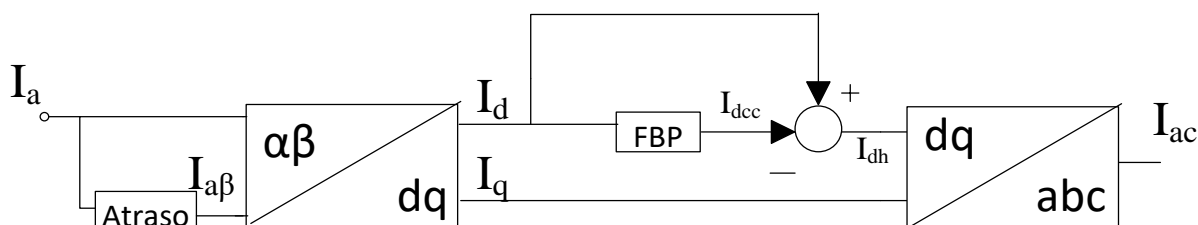
$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \text{sen } \theta \\ -\text{sen } \theta & \cos \theta \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_{\alpha} \\ I_{\beta} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Onde I_d e I_q são as componentes no eixo síncrono das correntes medidas no eixo estacionário trifásico *abc* e θ é o ângulo que dá a posição dos eixos síncronos

de referência obtidos através de um sistema de detecção de fases (PLL – Phase-Locked Loop).

Entretanto para este método ser aplicado individualmente em cada fase do SEP, é necessário gerar as variáveis de entrada das outras duas fases, uma vez que se aplica a uma fase somente e que o cálculo é realizado para as três fases. Uma solução é retirar a transformada de Clark e aplicar um atraso de 90° na corrente medida (MODESTO, 2007), assim substituem-se as variáveis dos eixos $\alpha\beta$ pela própria corrente da fase I_a , mas com o atraso, por exemplo $I_{a\beta}$, como demonstra o diagrama de blocos da Figura 13, substituindo as variáveis geradas pela transformada retirada do algoritmo.

Figura 13: Diagrama de blocos do método SRF aplicado em sistema monofásico.



Fonte: Autoria própria.

Se houver harmônicos na carga a resposta no eixo dq terá forma alternada sobreposta ao valor contínuo. Como o valor médio de I_d representa a parte ativa da corrente deve-se então separar a parcela harmônica (I_{dh}) da fundamental (I_{dcc}). Para isso utiliza-se o filtro passa baixa para extrair a parcela com componentes harmônicas I_{dh} , assim como mostrado na Figura 13. Quando o objetivo também for compensar reativos, a corrente I_q calculada não precisa ser filtrada. Por fim, aplica-se a transformada inversa de Park para obter a corrente de compensação I_{ac} .

2.4.2 Controle Simplificado

O controle simplificado é um método baseado no monitoramento da corrente da rede, a Figura 14 mostra o seu diagrama quando implementado em um FAP. Esse tipo de configuração também é utilizada para gerar as referências de corrente e tensão de sistemas UPS (uninterruptible power supply) monofásicos

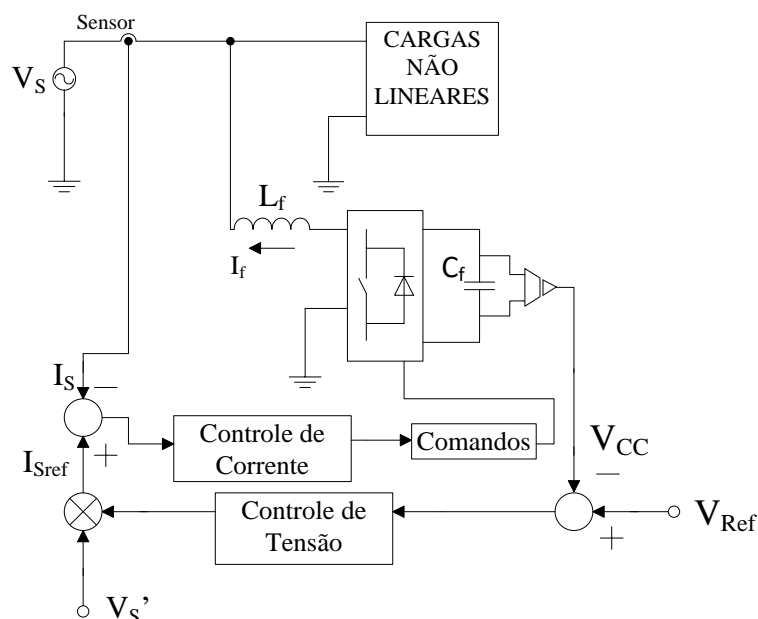
(MODESTO et al., 2013), que atuam no controle de fluxo de energia para fazer supressão de harmônicos de corrente e tensão.

O método é chamado de simplificado, pois, não é necessário realizar cálculos para determinar as componentes fundamentais e harmônicas da corrente da carga, o que elimina a necessidade de monitoramento da corrente do filtro e da carga (FENILI, 2007), o que reduz o número de sensores, tornando o projeto mais barato.

Diferentemente do controle convencional, o simplificado realiza o cálculo da corrente de referência a partir da malha de tensão do barramento CC, gerando a corrente que a rede deve fornecer na qual deve ser referente a energia ativa da carga mais as perdas do FAP. Portanto, considerando o sistema já em regime, se a carga demandar um aumento na potência ativa, o capacitor C_f inicialmente irá descarregar devido a esse acréscimo de carga. Assim ao monitorar e comparar a tensão do barramento com uma tensão de referência V_{ref} , gera-se um erro que será tratado por um controlador de tensão, ajustando a tensão do capacitor C_f , equilibrando novamente o fluxo de potência. A resposta desse controle fornece a amplitude da corrente de referência da rede I_{sref} , que é gerada quando se multiplica a saída do controlador com uma amostra da tensão da rede V_s' (POTTKER, 2004; POTTKER et al, 2004; FENILI, 2007). O processo inverso ocorre caso haja uma redução da potência ativa da carga, o que irá elevar o nível de tensão do barramento CC causando assim a diminuição da amplitude da corrente de referência.

A partir do monitoramento da corrente da rede, pode-se realizar a comparação com a corrente de referência, gerando um erro que será analisado pela malha de corrente, que por sua vez enviará os sinais de comando para as chaves de potência do inversor, fazendo com que a corrente I_f corresponda aos harmônicos e reativos da carga somada a uma parcela de corrente fundamental capaz de manter a tensão do barramento CC controlada.

Figura 14: Diagrama do FAP com método de controle simplificado.



Fonte: Autoria Própria.

Essa estratégia de controle tem algumas vantagens como redução de número de sensores de corrente, menor complexidade de cálculos o que diminui o esforço computacional. Porém, esse método tem uma desvantagem que é devido a uma ação lenta de controle da tensão do barramento CC. Como essa tensão do capacitor tem uma oscilação é necessário que o controlador de tensão tenha resposta bem lenta. Evitando que essa oscilação não seja percebida e inserida no cálculo da corrente de referência, comprometendo o resultado do cálculo. Caso isso aconteça, um erro seria introduzido na rede, conseqüentemente elevando a taxa de distorção harmônica da corrente fornecida pela rede elétrica. Por esse motivo, a resposta dinâmica do FAP fica mais lenta, devido a essa característica do controle de tensão.

Outro ponto desfavorável desse método é em relação a geração da corrente de referência. Como explicado anteriormente, uma amostra da tensão da rede (V_S') é multiplicada ao valor de saída do controlador de tensão do barramento CC. Isso é feito para que a corrente de referência da rede tenha uma forma de onda mais próxima da senoidal, além de sincronizar a fase da corrente gerada com a tensão da rede. Contudo, nessa maneira de calcular é considerado que a tensão fornecida pelo SEP não apresenta distorções ou desequilíbrios. Um fato que na prática não é sempre verdade. Então, como o cálculo da referência é dependente dessa tensão,

estes distúrbios seriam inseridos na malha de controle, fazendo com que o FAP não atue corretamente.

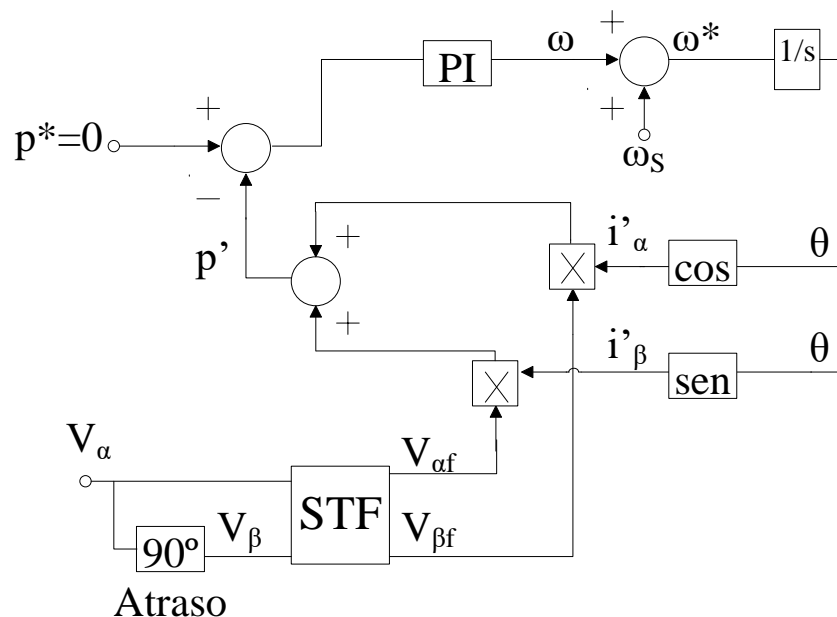
Buscando solucionar estes problemas nas seções seguintes serão apresentadas propostas para melhorar a resposta dinâmica do método de controle simplificado, onde a ideia principal é adicionar um tipo de filtro na malha de tensão, ajustar a velocidade do controlador o tornando mais rápido, melhorando a dinâmica da técnica simplificada, sem introduzir as oscilações da tensão do barramento CC na referência de corrente. Outra alteração é o uso de um sistema de detecção de frequência e ângulo de fase da tensão da rede, obtido através de um sistema de sincronismo PLL. Com o objetivo de gerar a frequência e a fase necessárias para a corrente de referência, ao invés de utilizar a amostra da tensão, garantindo uma maior imunidade dos distúrbios que podem estar presentes na tensão da rede.

2.4.2.1 Sistema de sincronismo (PLL)

Ao utilizar um algoritmo PLL no cálculo de geração da corrente de referência, substituindo a amostra da tensão da rede, reduz a possibilidade de um distúrbio de tensão influenciar no funcionamento do FAP. Além desta vantagem, o sistema de detecção de fase, irá fornecer a fase e frequência necessárias para a corrente de referência, garantindo que esteja sincronizado com a tensão da rede.

O modelo de PLL aplicado neste trabalho será o STF-pPLL, explicado com detalhes em (BACON, et al 2012; SILVA, et al 2008). Esse nome é dado devido ao uso conjunto de um filtro auto-sintonizante (STF – self tuning filter) com o algoritmo do pPLL, como mostra o esquema da Figura 15. Isso é feito porque o pPLL é baseado na teoria de potência ativa instantânea, que é suscetível a presença de harmônicos de tensão, por isso a necessidade do uso do filtro na estrutura do modelo.

Figura 15: Diagrama de blocos do STF-pPLL.



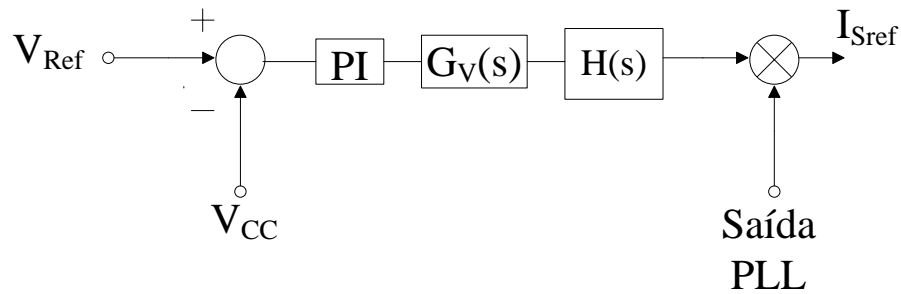
Fonte: Autoria própria

Interessante observar que a teoria em que o método se baseia, calcula uma potência ativa trifásica. Contudo, o pPLL pode ser utilizado para um sistema monofásico, a partir da geração de uma variável fictícia no sistema de eixos estacionários bifásicos, assim como no modelo por (MODESTO, 2007), explicado na seção 2.4.1.1.

2.4.2.2 Controle Simplificado Com Filtro de Primeira Ordem

A primeira proposta de alteração é utilizar o modelo computacional de um filtro passa baixas de primeira ordem na configuração RL (resistência e indutor). Ao fazer essa adição no sistema, está se inserindo um elemento com uma dinâmica na planta. Para que se tenha a nova malha de controle de tensão é necessário multiplicar a equação (8) do barramento CC pela função do filtro passa baixas, conforme é mostrado na Figura 16. Assim pode-se projetar o controlador da planta, onde o mais recomendado a se utilizar é o PI, devido a característica integrativa da planta de controle (FENILI, 2007).

Figura 16: Malha de tensão proposta com FPB 1ª ordem

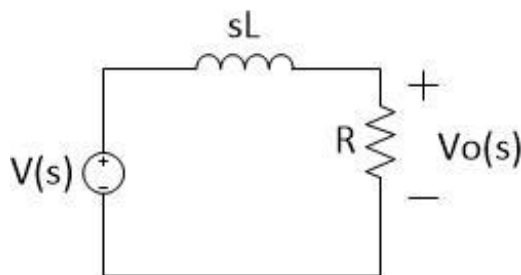


Fonte: Autoria própria.

A dedução desta função do filtro de primeira ordem apresentada aqui é dada por (NILSSON; RIEDEL, 2009), a partir da análise do circuito RL no domínio da frequência, mostrado na Figura 17. A FT desse circuito é dada pela equação (22).

$$H(s) = \frac{\frac{R}{L}}{s + \frac{R}{L}} \quad (22)$$

Figura 17: Circuito RL no domínio da Frequência.



Fonte: Autoria própria.

Fazendo $s=j\omega$, pode-se analisar a resposta em frequência da equação 22 e assim dividi-la em duas equações, uma de módulo e uma de fase.

$$|H(j\omega)| = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{\omega^2 + (\frac{R}{L})^2}} \quad (23)$$

$$\theta(j\omega) = -\text{tg}^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \quad (24)$$

Analisando as equações 23 e 24, para $\omega=0$ o módulo de $H(j\omega)$ será igual a 1 e a fase $\theta(j\omega) = 0^\circ$. Já para $\omega=\infty$, o módulo tende a zerar e o ângulo θ ficará em 90° . A frequência de corte ω_C é definida na frequência onde $|H(j\omega)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * H_{pico}$, assim tem-se a equação 25.

$$|H(j\omega_C)| = \frac{1}{\sqrt{2}} * H_{pico} = \frac{\frac{R}{L}}{\sqrt{\omega_C^2 + (R/L)^2}} \quad (25)$$

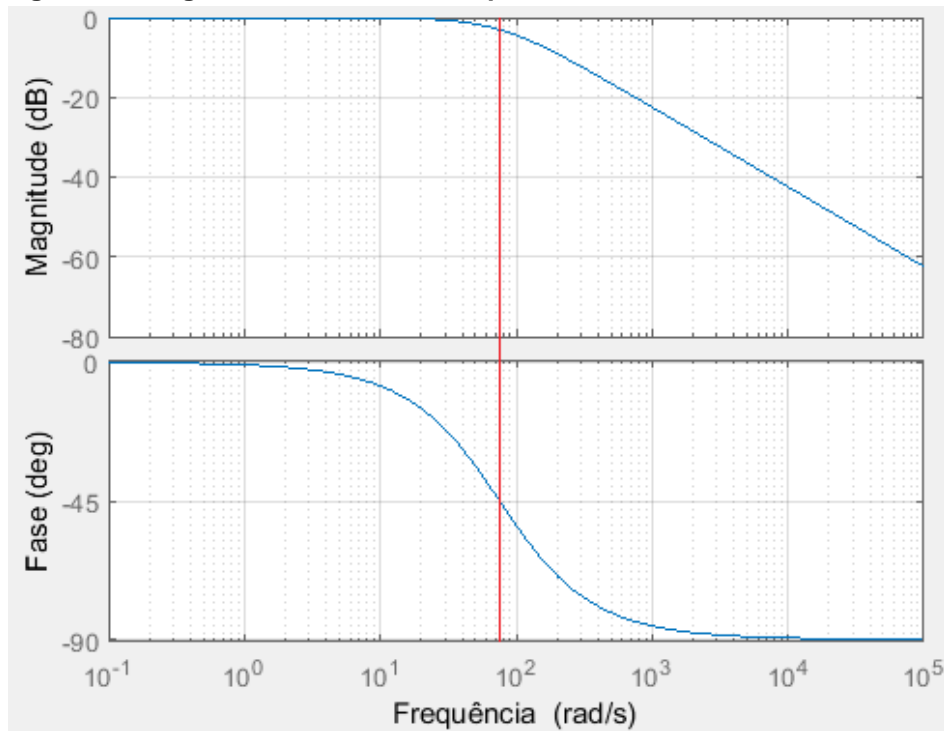
Isolando ω_C obtém-se a relação $\omega_C=R/L$, a partir daí substituindo na equação 22, temos a FT do filtro primeira ordem em função da frequência de corte.

$$H(s) = \frac{\omega_C}{s + \omega_C} \quad (26)$$

A característica desse filtro pode ser verificada através do diagrama de Bode da equação 26, apresentado na Figura 18. Onde percebe-se uma atenuação de aproximadamente 20 dB/década para este tipo de filtro.

A função transferência final da planta, que agora é composta pelo modelo do filtro passa baixa de 1ª ordem em série com o modelo físico do barramento CC, é representado pela equação 27.

Figura 18: Diagrama de Bode do filtro passa baixa 1ª ordem.

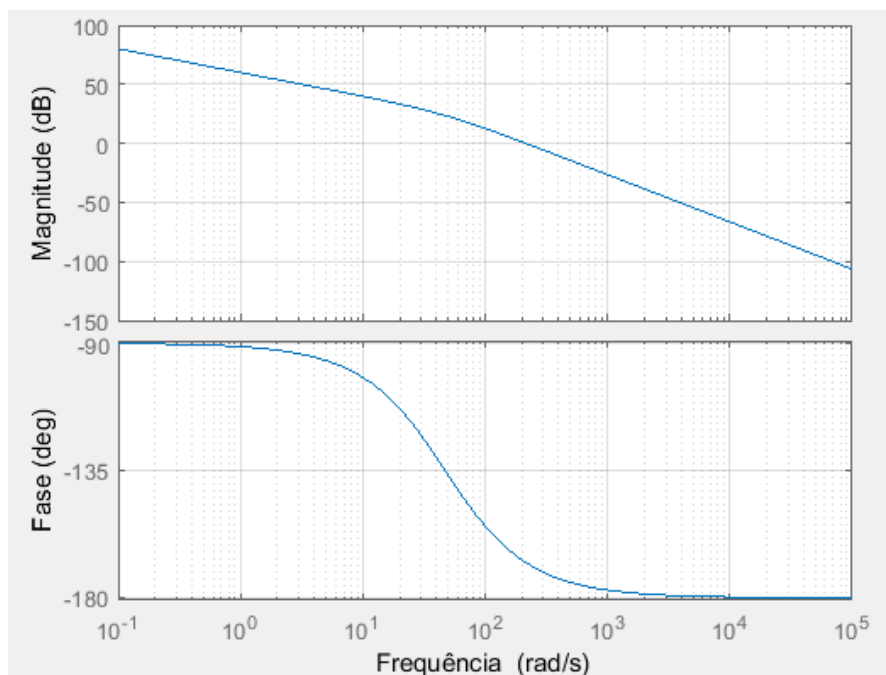


Fonte: Autoria própria.

$$H_V(s) = \frac{\omega_c}{s^2 C_f + s C_f \omega_c} \quad (27)$$

Importante verificar que na Figura 18, o filtro passa baixa de 1ª ordem tem um atraso de fase de 45° na frequência de ω_c . Esse atraso será considerado no momento em que se adiciona o filtro na planta de controle de tensão. Esse efeito pode ser visto no diagrama da Figura 19 da resposta em frequência da equação 27.

Figura 19: Diagrama de Bode de $H_v(s)$.



Fonte: Autoria própria.

2.4.2.3 Controle Simplificado Com Filtro de Média Móvel

A segunda proposta é a utilização do filtro média móvel (FMM) para suprimir as oscilações devido a variação da tensão no capacitor C_f . O FMM tem uma vantagem que é sua velocidade de resposta. Pois só depende do número de pontos necessários para calcular o valor médio, além de ser implementado digitalmente tornando-o um algoritmo de processamento simples (MODESTO, 2007).

Esse nome é dado ao filtro pois ele calcula o valor médio de um sinal de entrada. Ou seja, a partir de uma série de intervalos desse sinal, o filtro média móvel substitui o ponto central pelo valor médio dos intervalos (CERQUEIRA et al., 2000), podendo ser calculado para sistemas discretos pela equação (28).

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (28)$$

Para que se possa incluir o FMM na malha de controle de tensão é necessário obter a sua função transferência. Para isso tem de se conhecer a sua equação para um sistema contínuo. Já que a média móvel calcula o valor médio a partir da integração de vários intervalos de tempo, considerando-o como um FPB,

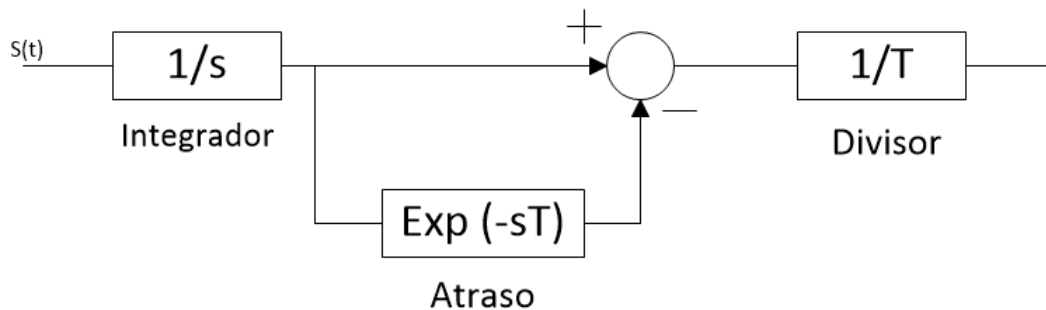
esse intervalo de tempo se equivale a frequência de corte de um filtro. A partir desse cálculo o FMM atenua frequências múltiplas do período do sinal de entrada (MODESTO, 2007). Assim pode-se definir o filtro média móvel para sistemas contínuos pela equação (29).

$$FMM = \frac{P}{T} \int_{T/P}^t s(t) dt \quad (29)$$

Onde P é o múltiplo do período da frequência da entrada do sistema e $s(t)$ é o um determinado sinal de entrada do filtro.

O diagrama de blocos do FMM, dado pela Figura 20 pode ser representado através de um integrador, um atraso que define o seu período de integração e uma divisão dada pelo número de pontos que se deseja calcular, em outras palavras a frequência de corte do filtro.

Figura 20: Diagrama de blocos do Filtro Média Móvel.

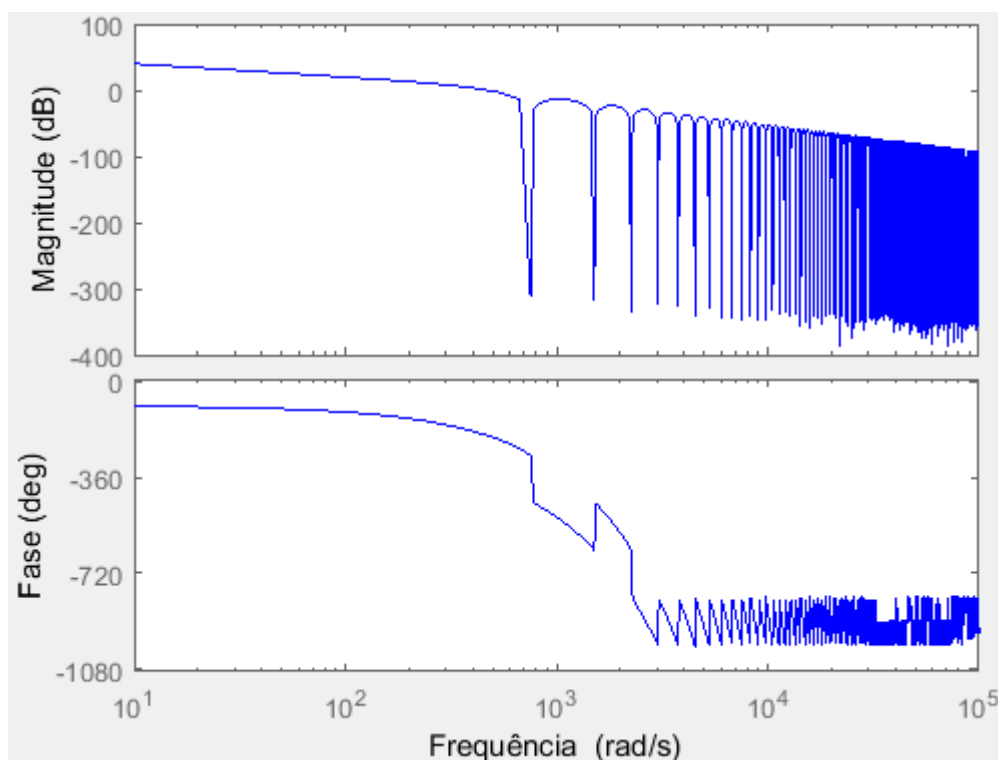


Fonte: Autoria própria.

A FT do diagrama de blocos da Figura 20 é dado pela equação (30). Para confirmar o funcionamento do filtro média móvel, a resposta em frequência é mostrada na Figura 21.

$$M(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{sT} \quad (30)$$

Figura 21: Diagrama de Bode do FMM.

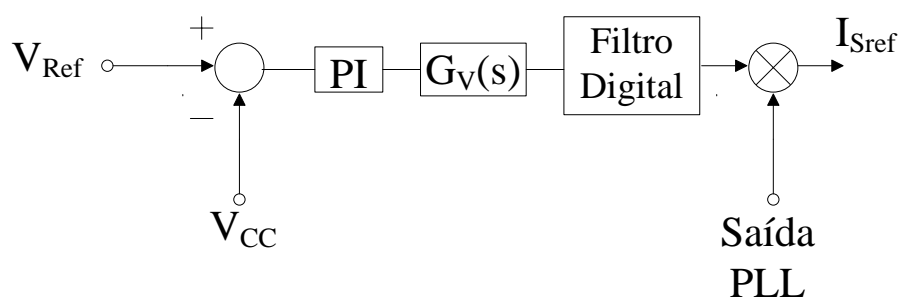


Fonte: Autoria própria.

Analisando o diagrama de Bode da Figura 21, percebe-se que há uma atenuação de aproximadamente 300dB apenas em determinadas frequências, as quais são respectivamente a frequência de corte e suas múltiplas.

Assim como na seção anterior a nova malha de tensão é gerada através da multiplicação da função transferência do FMM com o da equação (8). Mostrado na Figura 22, o mesmo tipo de controlador é utilizado para este caso.

Figura 22: Malha de tensão proposta com FMM.



Fonte: Autoria própria.

Onde o bloco “Filtro Digital” representa o diagrama do filtro média móvel da Figura 20. A função de transferência da nova malha é dada pela multiplicação das FTs da equação (30) e (8).

$$G_V(s) * M(s) = \frac{1-e^{-sT}}{s^2 C_f T} \quad (31)$$

2.4.3 Resposta em Operação da Malha de Tensão do Controle Simplificado

Afim de se realizar uma comparação prévia dos métodos de controle simplificado, foi feita a resposta em frequência de cada topologia já com o controlador PI, verificando o seu funcionamento e conseqüentemente sua dinâmica.

Para que essas simulações sejam realizadas é preciso definir alguns dados, por exemplo o capacitor utilizado no barramento CC e as frequências de corte desejadas para cada filtro.

Visto que a partir da topologia de inversor utilizada, o valor de potências a serem processadas está entre 500VA a 10kVA (POTTKER, 2004). Logo pela equação 32, determina-se a capacitância do barramento CC com base na potência reativa Q_f do filtro, a qual é demandada pela carga (FENILI, 2007) e pelo valor de porcentagem de ondulação de tensão sendo 10%, valor já geralmente utilizado na maioria das literaturas.

$$C_f = \frac{Q_f}{f_{rede} * (V_{CCmax}^2 - V_{CCmin}^2)} \quad (32)$$

Considerando a potência que esse tipo de inversor pode processar, define-se uma potência reativa de aproximadamente 4kVAr, além da tensão do barramento de 400V, a capacitância calculada inicialmente é de $C_f = 2mF$.

Para definir a frequência de corte de cada filtro, deve-se conhecer a frequência da oscilação do barramento que estará presente na malha. Sabe-se que o inversor de tensão em ponte completa é um conversor bidirecional em corrente. Ou seja, pode trabalhar tanto na absorção quanto na injeção de potência no sistema. Vendo que é necessário que o inversor absorva uma parcela de potência ativa da rede para carregar o capacitor do barramento mantendo a tensão controlada. Pode-se dizer

que nesse sentido o conversor tem comportamento de um retificador de onda completa. Nesse caso a oscilação presente no capacitor é de duas vezes a frequência da rede que é de 60Hz, logo a oscilação tem frequência de 120Hz.

O filtro de primeira ordem apresentado, tem uma atenuação de 20dB/década. Dessa forma para ter uma atenuação de 20dB, o filtro deve estar sintonizado na frequência de pelo menos 10 vezes menor que a frequência da oscilação. Já o filtro média móvel pode ser sintonizado na frequência de 120Hz, pois ele irá filtrar a componente de 120Hz e suas possíveis frequências múltiplas.

Agora pode-se obter a resposta em frequência dos métodos de controle a partir do diagrama de Bode. Lembrando que para essas simulações já será considerada a atuação do controlador PI afim de garantir o valor da tensão do barramento CC controlada.

Como explicado na seção anterior (2.3.3), o controlador proporcional integral é o elemento que vai atuar na planta de controle, para que o sistema compensado tenha as características necessárias do projeto. Para que isto aconteça deve-se calcular os ganhos proporcional e integral para cada modelo, porém respeitando alguns limites que são definidos pelo tipo de sistema em que se trabalha. Por exemplo, para o controlador da tensão do barramento CC, a frequência de cruzamento limite do PI é de 120Hz, devido a oscilação presente no inversor de tensão. Já para o controle de corrente, o posicionamento da frequência em zero deve estar entre um quarto e um décimo da frequência de chaveamento, para evitar interferências nas malhas de controle (MODESTO, 2015). Explica-se também que em relação a margem de fase do controlador, define-se entre os ângulos de 45° e 90° pois, estando dentro dessa faixa de valores é garantida a estabilidade da planta, uma vez que se trata de um sistema chaveado.

Os valores dos ganhos, tanto quanto os valores de margem de fase e frequência de cruzamento obtidos são dados pela tabela 1. Considerando que são valores iniciais, priorizando apenas a comparação dos métodos e verificação do possível funcionamento do sistema. Sendo que serão comparados os métodos de controle simplificado sem filtros, com filtro de primeira ordem e com filtro média móvel.

Tabela 1: Dados dos controladores PI de cada método.

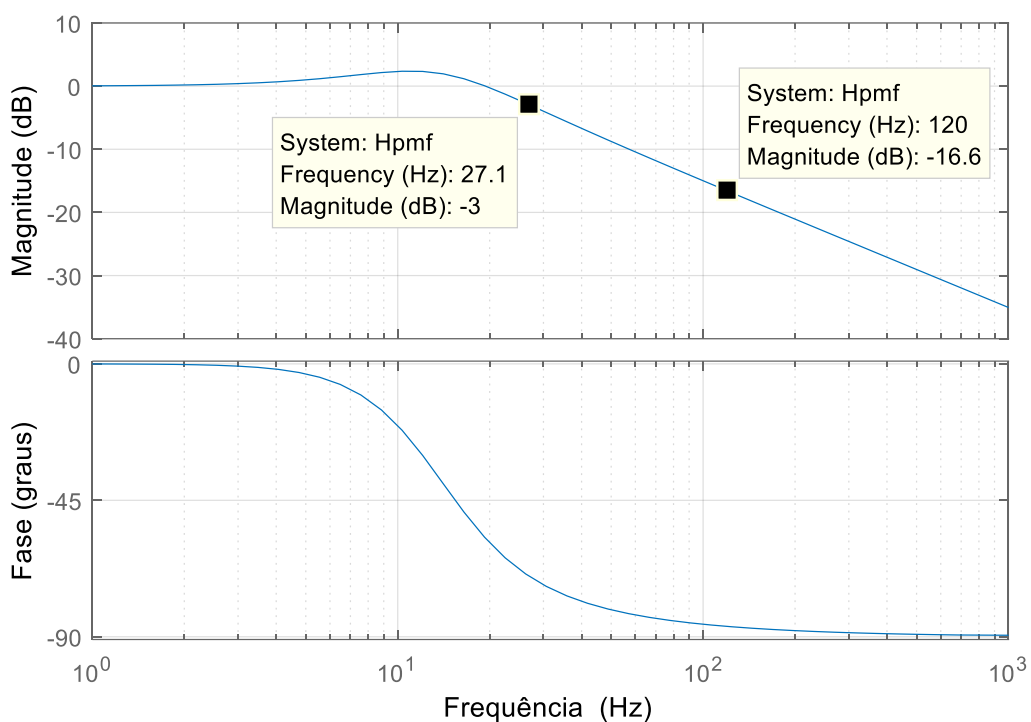
Método de Controle Simplificado	Margem de fase (graus)	Frequência de Cruzamento (Hz)	Kp (Ω)	Ki(Ω/s)
Sem filtro	62	20	0,2803	19,0626
Filtro 1ª Ordem	38	12	0,2721	2,5193
Filtro Média Móvel	38	30	0,5343	12,3667

Fonte: Autoria própria.

Interessante observar na tabela 1 que os métodos com filtro tiveram margem de fase menor que 45° . Ou seja, um valor abaixo do limite que garante a estabilidade do sistema. Isso acontece devido aos filtros passa baixas terem uma margem de fase própria de -45° , a qual é somada ao sistema quando o filtro é tratado como parte da planta de controle. Com isso a faixa de valores de ϕ_D que garantem a estabilidade deve ser reajustada, de modo que pela equação (19) a margem de fase do controlador (ϕ_c) esteja entre 0° e -45° . Respeitando este intervalo, pode-se garantir que o valor de Ki não será negativo, uma vez que a tangente de ϕ_c determina essa situação, segundo a equação (18). Agora sobre o modelo de controle com FPB 1ª ordem, observou-se a menor frequência de cruzamento entre os métodos simulados. Isso acontece devido a sintonização do filtro, que limita também a banda passante do sistema compensado. Diferente dos outros dois casos, por exemplo o sem filtro, a única limitação na frequência é a dada pelo inversor de tensão, explicado anteriormente. Já para o modelo com o FMM, o filtro é sintonizado em 120Hz, garantindo uma maior faixa de valores para a operação do sistema.

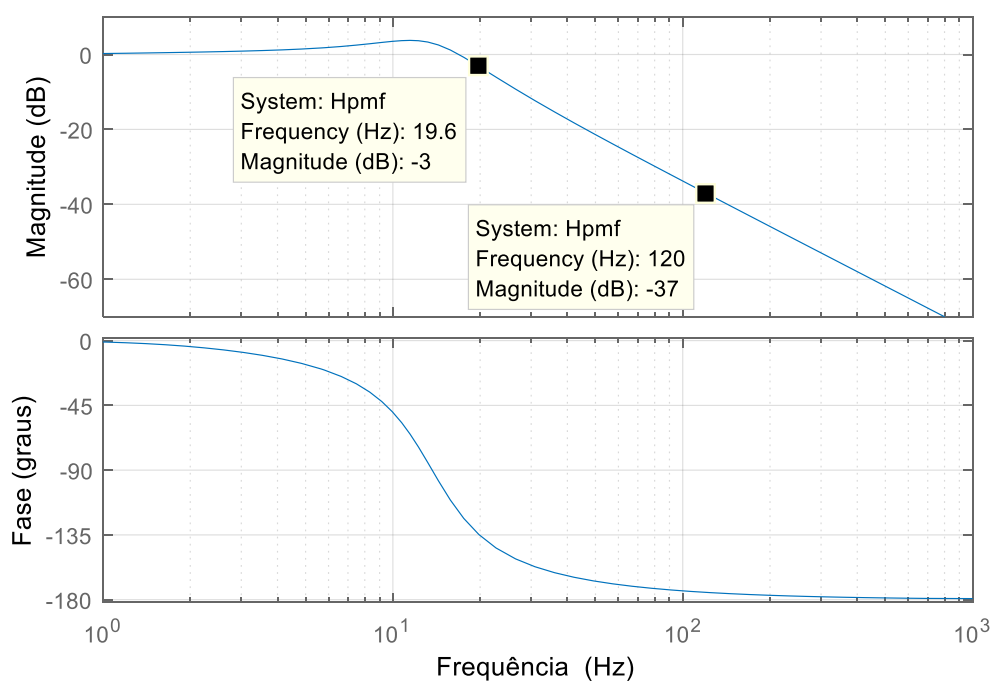
O diagrama de Bode em malha fechada simulados através da ferramenta Matlab para o controle sem filtro, com filtro 1ª ordem e FMM são mostrados respectivamente pelas Figuras 23, 24 e 25 a seguir.

Figura 23: Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado sem filtro.



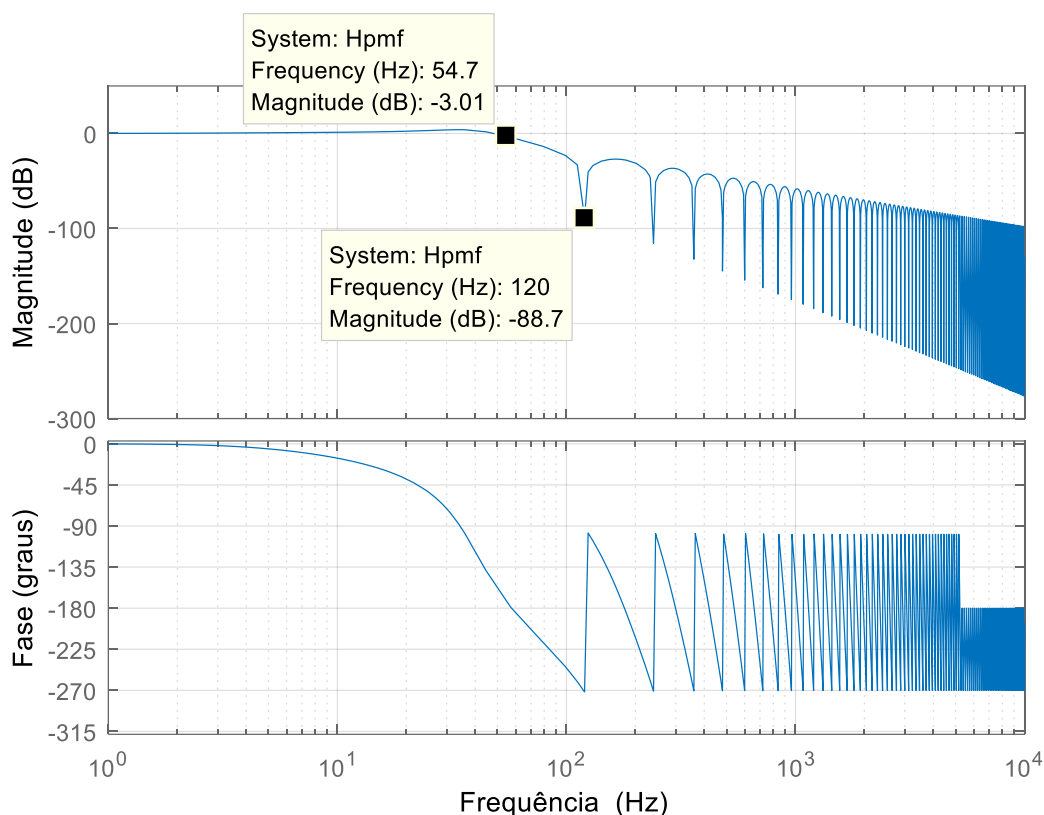
Fonte: Autoria própria.

Figura 24: Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado com FPB 1ª ordem.



Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Diagrama de Bode em malha fechada do controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

A partir da observação dos diagramas de Bode pode-se avaliar as vantagens e desvantagens de cada método. Considerando o aspecto da frequência de operação, pode-se perceber pela Figura 24 que o modelo utilizando o FPB apresentou a menor banda passante, com 19,6Hz. Ou seja, o sistema terá ação de controle mais lenta do que os outros dois modelos, onde apresentaram frequências de operação de 27Hz e 55Hz, respectivamente para os modelos sem filtro e com o FMM. Como já foi adiantado, o filtro de primeira ordem limita a frequência de operação, tornando o sistema mais lento quando comparado aos demais.

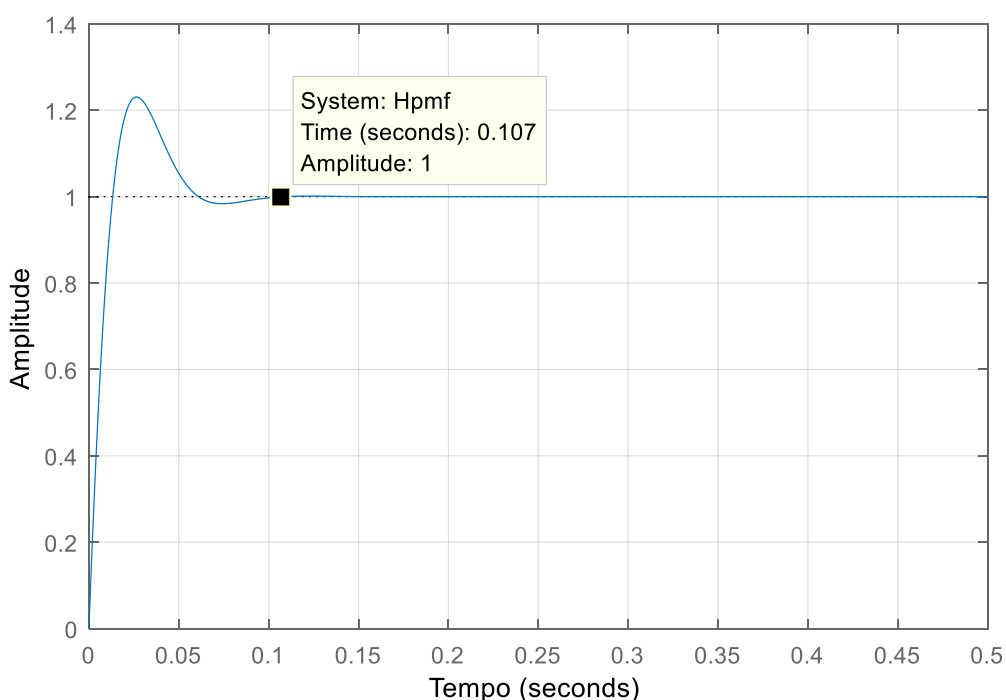
Agora, considerando o aspecto da atenuação do sinal na frequência de 120Hz, observa-se uma vantagem do modelo implementando o filtro de primeira ordem em comparação ao simplificado original. Uma vez que o ganho chega à aproximadamente -37dB, muito maior do que os -16,6dB ilustrado na Figura 23. Indicando que para a mesma frequência a oscilação será bem menor, resultando em

um sinal de controle com menor porcentagem de erros. Ainda assim, ao analisar o diagrama de Bode da Figura 25, percebe-se que o comportamento do modelo com o FMM tem melhor resposta em ambas as características analisadas. Maior frequência de operação de 55Hz e também a maior atenuação na frequência de 120Hz, aproximadamente 90dB. Ou seja, além de ter ação de controle mais rápida, ele garante que as oscilações do barramento sejam suprimidas, eliminando a possibilidade de que erros sejam inseridos no cálculo da referência.

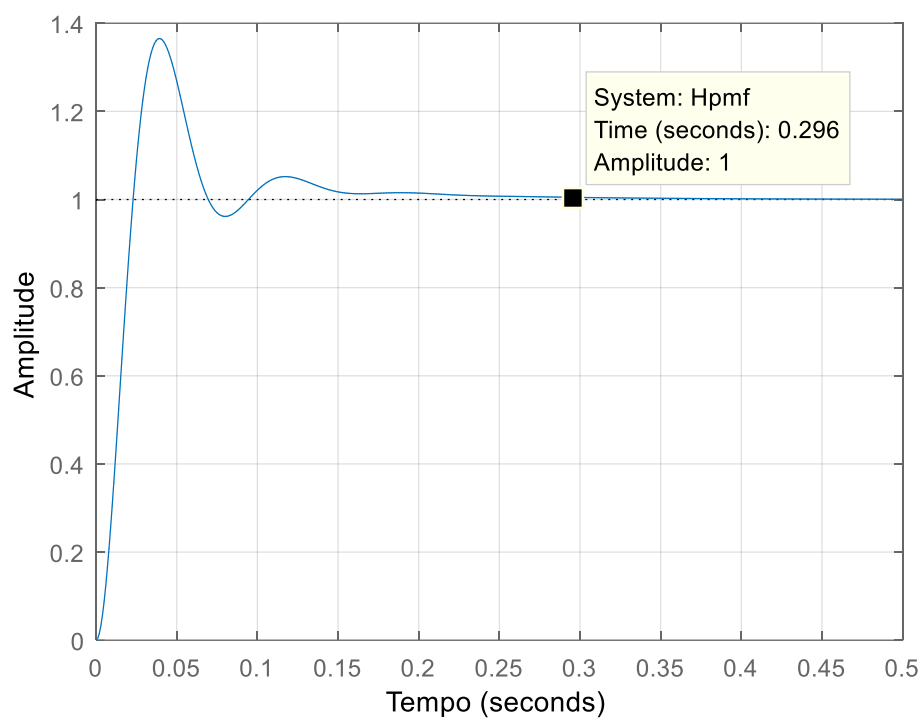
Porém uma desvantagem é que caso a oscilação do barramento apresente alguma componente fora das frequências múltiplas de 120Hz, o filtro média móvel não irá atenua-la com tanta eficácia, tornando seu comportamento mais próximo ao do modelo simplificado convencional.

A partir dos diagramas de Bode em malha fechada pode-se verificar a região de operação do sistema e também seu comportamento para variadas frequências. A fim de analisar a estabilidade do sistema e o tempo de resposta, as malhas de controle de tensão serão submetidas a um degrau unitário, mostrados nas Figuras 26, 27 e 28 sendo respectivamente controle simplificado sem filtros, com FPB e com FMM.

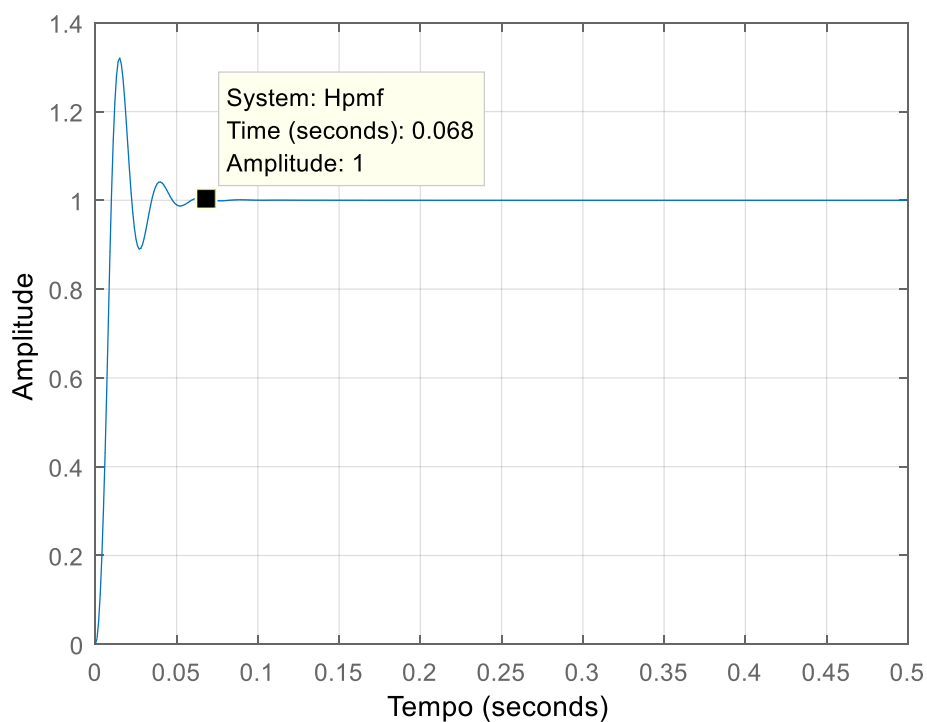
Figura 26: Resposta ao degrau do controle simplificado sem filtro.



Fonte: Autoria própria.

Figura 27: Resposta ao degrau do controle simplificado com FPB 1ª ordem.

Fonte: Autoria própria.

Figura 28: Resposta ao degrau do controle simplificado com FMM.

Fonte: Autoria própria.

Nas figuras apresentadas, o ponto em destaque é o instante onde foi considerado o tempo de resposta ao degrau de cada método, ou seja, quando o sistema alcança o valor seu final. Para os três casos observa-se que o erro de regime permanente é nulo, visto que a resposta ao degrau está normalizada.

A primeira impressão é que se confirma que o FPB atrasa a atuação do controle do barramento CC, visto que seu valor final foi atingido em 0,296 segundos, como mostra a Figura 27. Tempo de quase dois ciclos da rede, para a frequência de 60Hz com um período equivalente a 16,66ms.

Analisando os outros modelos, percebe-se coerência entre os diagramas de Bode e as respostas aos degraus apresentados. O método utilizando o FMM tem tempo de resposta de 0,068 segundos, mostrado na Figura 28. Ou seja, o dobro de velocidade se comparado ao modelo de controle simplificado convencional, que pela Figura 26 o seu tempo de acomodação foi de 0,1 segundos. Também correspondendo com o estudo feito a partir da resposta em frequência.

Outro ponto importante a destacar, são os sobressinais (também chamado de overshoot). Na Figura 27 o valor chegou a quase 40%, o que pode gerar uma alta corrente nos momentos transitórios. Para as outras duas figuras o valor foi de aproximadamente 20% e 30%. Esses overshoots podem ser considerados valores altos, significando um pico de tensão ou corrente no barramento CC do filtro ativo, o que necessitaria de cuidados para o projeto físico do FAP, aumentando a dimensão de dispositivos de proteção.

Na tabela 2, são resumidos os dados observados em cada análise obtidos pelo diagrama de Bode e resposta ao Degrau Unitário. A partir deles percebe-se que nem todos os filtros atuam bem nesse caso.

Tabela 2: Dados analisados nos estudos dos Diagramas de Bode e Respostas aos degraus.

Parâmetros de Projeto para Melhor Desempenho				
Modelos de Controle Estudados	Região de Operação	Atenuação em 120Hz	Tempo de Resposta	Sobressinal
Simplificado (s/ Filtro)	27 Hz	16,6 dB	0,108 s	20%
FPB de 1ª Ordem	16,2 Hz	39,3 dB	0,296 s	40%
Filtro Média Móvel	55 Hz	90 dB	0,068 s	30%

Fonte: Autoria Própria

2.4.4 Considerações do capítulo

Neste capítulo foram estudadas duas propostas diferentes, onde uma se mostrou eficaz na melhoria das características principais do FAP, que são os objetivos deste trabalho. Já na outra apresentou dificuldade em atingir a estabilidade, influenciando na dinâmica. Em todas as discussões o modelo com o filtro média móvel obteve o melhor desempenho. Isso pode ser explicado devido a ele ser um filtro digital, que tem resposta mais rápida graças a forma de como é implementado. Também, estar sintonizado na frequência de oscilação do barramento CC, permitindo o sistema trabalhar em uma frequência maior. Além disso, pelo seu modo de operação que resulta em uma alta atenuação das componentes presentes no controle da tensão.

No caso de utilizar o filtro passa baixas na planta de controle, ocorreu que apesar de aprimorar a atenuação das oscilações, a dinâmica foi afetada. Principalmente pelo fato da limitação imposta pela frequência de sintonia do FPB, e também por sua FT, ter característica de um sistema sobre-amortecido.

Nas seções seguintes, serão realizadas as simulações do sistema físico do FAP, corrigindo as distorções causadas por uma carga. Os parâmetros de projeto serão os mesmos testados neste capítulo. Desta forma, será mais evidente a resposta de cada modelo, colaborando com análise feita aqui e com a definição de qual método tem melhor resultado.

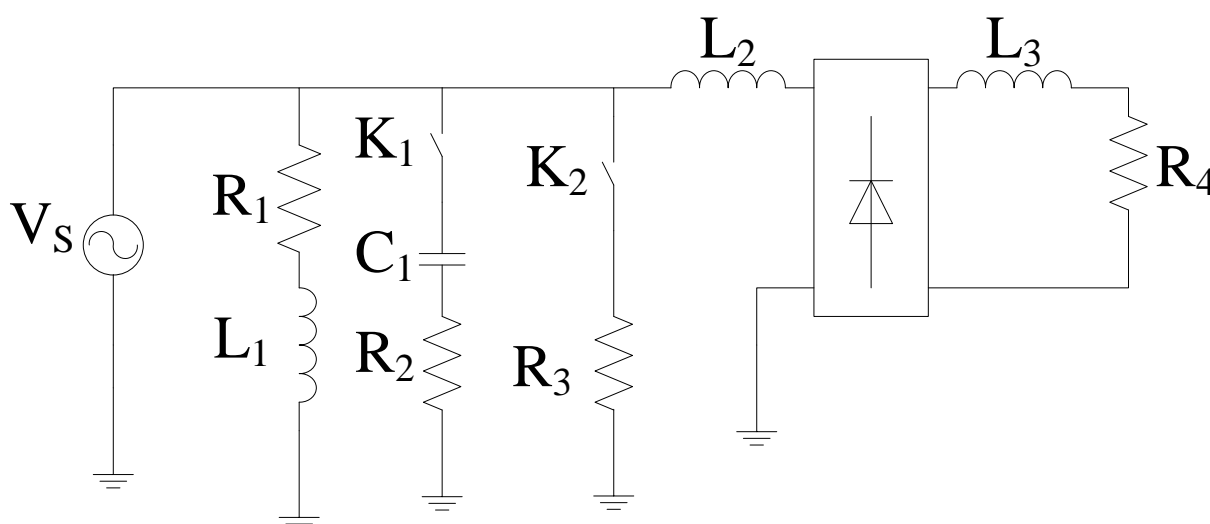
3 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Neste capítulo serão apresentadas as simulações dos sistemas físicos dos modelos estudados anteriormente. Os dados obtidos são importantes para corroborar com as considerações das análises anteriores, baseados na resposta em frequência e resposta ao degrau unitário. Colabora também com o estudo da melhora da resposta dinâmica dos filtros ativos, através da modificação da estrutura de controle proposta neste trabalho.

Também serão apresentadas as simulações do método de controle convencional, estudado na seção 2.4.1.1 que é baseado no SRF e aplicado em sistemas monofásicos. Com o intuito de comparar uma estratégia mais complexa de controle com os resultados obtidos dos métodos simplificados.

Para uma análise correta de resultados, necessita-se que todas as simulações sejam feitas para o mesmo tipo de carga, para assim distinguir e destacar os comportamentos dos métodos. A Figura 29, ilustra a carga utilizada nos testes de cada modelo, em seguida a Figura 30 mostra a corrente da carga.

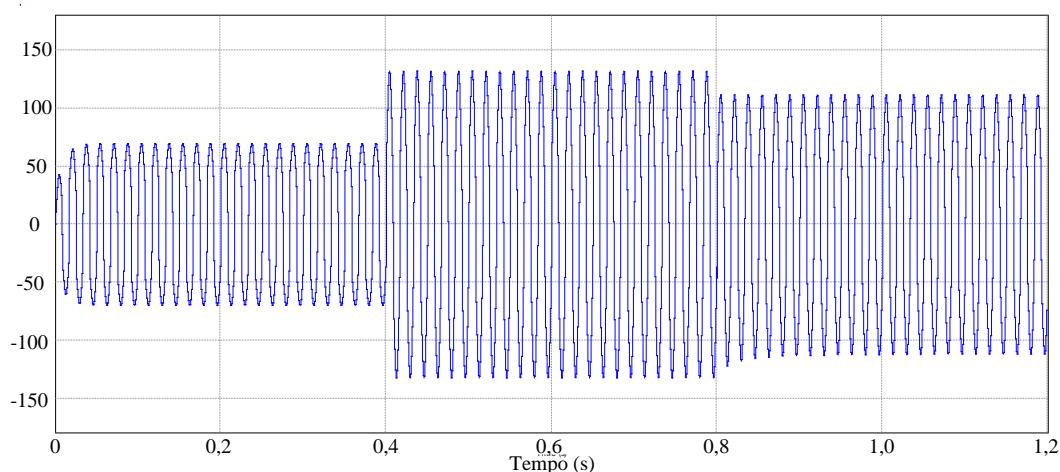
Figura 29: Configuração da carga utilizada na simulação.



Fonte: Autoria própria

A carga simulada é composta de alguns ramos que ficam conectados à rede durante todo período de simulação, e outros dois comandos pelas chaves K_1 e K_2 que simulam em instantes diferentes um degrau de carga e depois uma saída de carga. Basicamente os conjuntos são de cargas indutivas e capacitivas com exceção do retificador em ponte com filtro indutivo. O tempo de entrada e saída de carga funcionará da seguinte forma: inicialmente a chave K_2 está aberta, após 0,4 segundos é dado o comando para fecha-la conectando a resistência R_3 no sistema. Logo em seguida, exatamente 0,4 segundos depois, a chave K_1 é aberta desconectando o capacitor C_1 e resistência R_2 da rede. A tabela 3 indica as dimensões de cada um dos elementos.

Figura 30: Corrente da carga simulada.



Fonte: Autoria própria

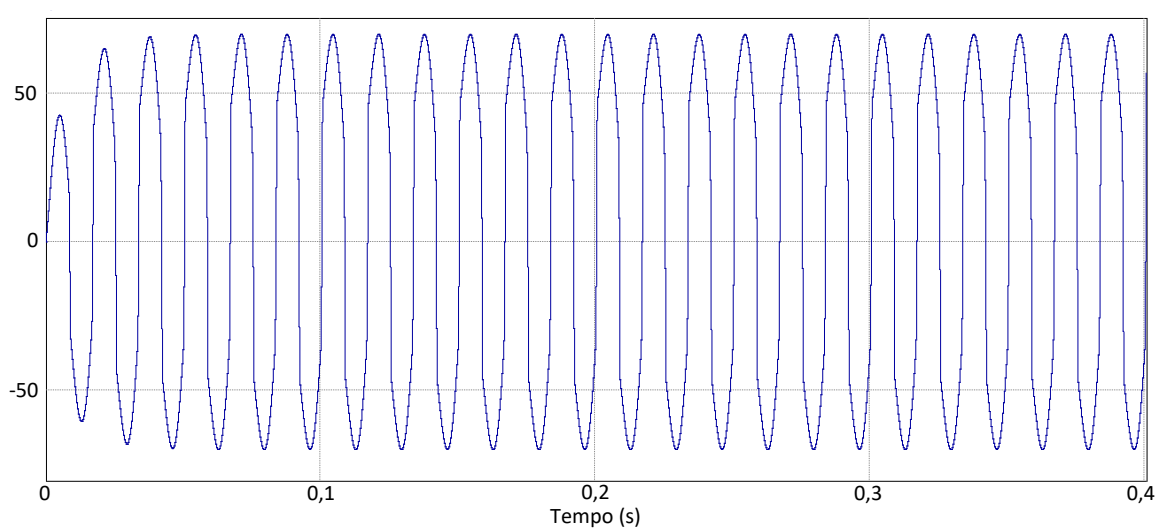
Tabela 3: Dados dos elementos da carga simulada.

Dados da carga simulada	
Elementos	Grandezas
R_1	20 Ω
R_2	12 Ω
R_3	5 Ω
R_4	5 Ω
L_1	45 mH
L_2	351 μ H
L_3	50 mH
C_1	470 μ F
V_s	220V (eficaz)

Fonte: Autoria Própria

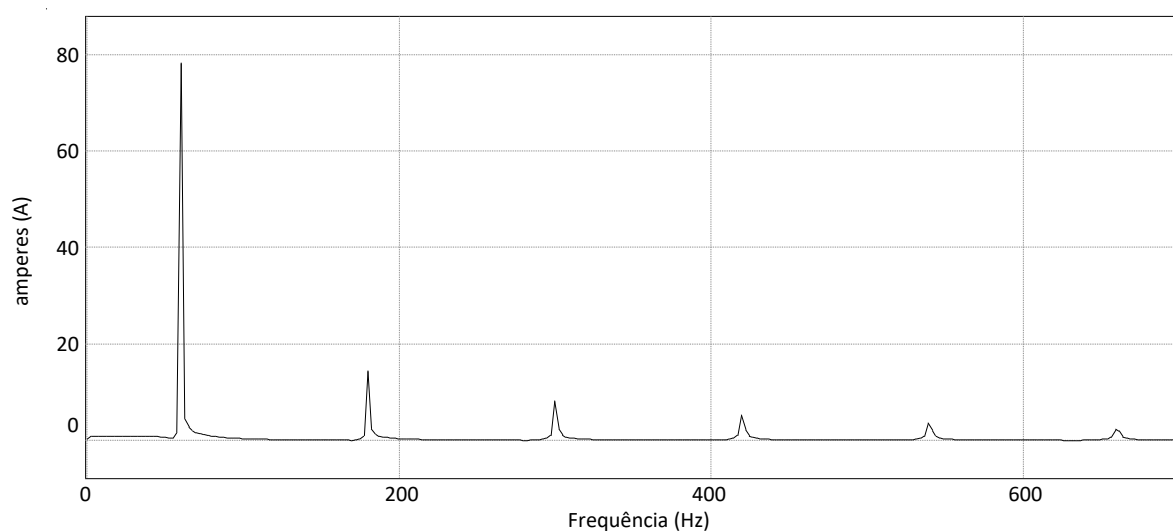
Para verificar a presença de distorções, a Figura 30 será dividida em três intervalos, facilitando a visualização da forma de onda e possibilitando o cálculo das componentes harmônicas presentes em cada período. Na Figura 31 é mostrado o intervalo entre 0 e 0,4 segundos, seguido do espectro de frequência calculado para este mesmo intervalo, dado pela Figura 32.

Figura 31: Corrente da carga entre 0 e 0,4 segundos.



Fonte: Autoria própria

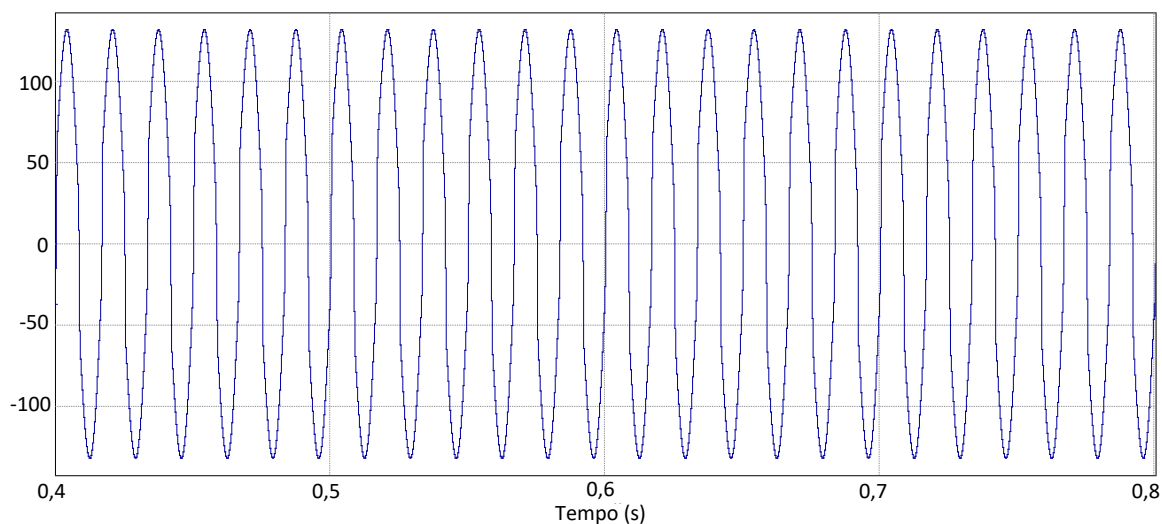
Figura 32: Espectro da corrente da carga entre 0 e 0,4 segundos.



Fonte: Autoria própria

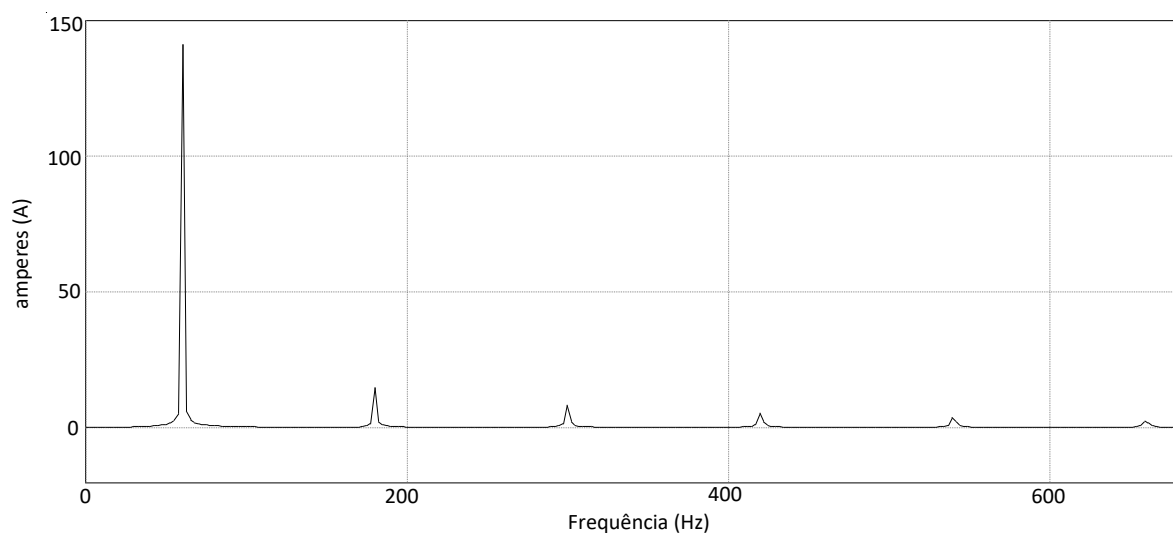
Pela Figura 32, percebe-se que há presença de conteúdo harmônico visto pelas componentes de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem. Após o degrau de carga essa mesma característica é notada nas Figuras 33 e 34.

Figura 33: Corrente da carga entre 0,4 e 0,8 segundos.



Fonte: Autoria própria

Figura 34: Espectro da corrente da carga entre 0,4 e 0,8 segundos.

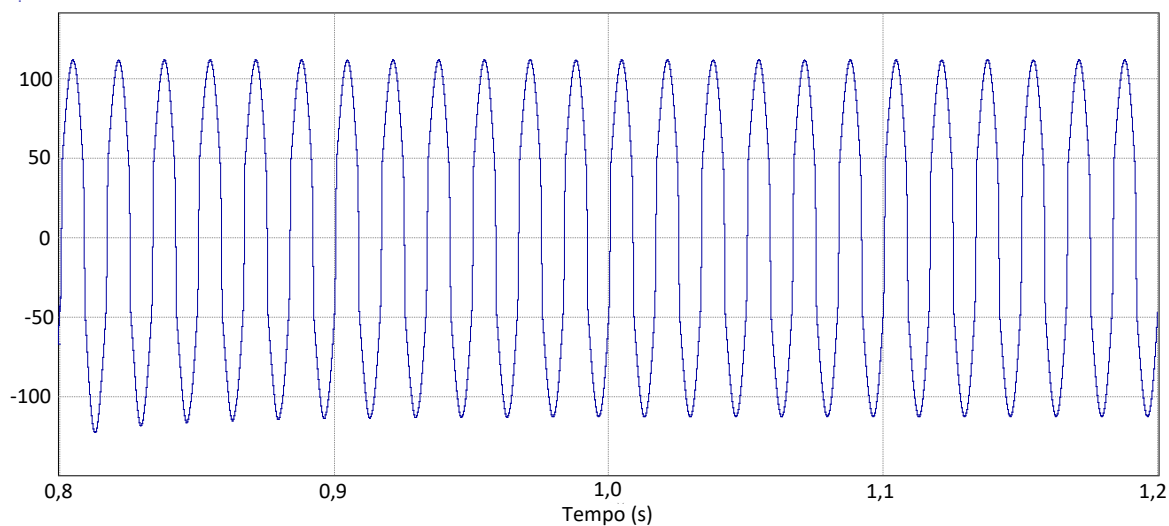


Fonte: Autoria própria

A partir da saída de carga é esperada a redução da amplitude da corrente, o que causa redução da componente fundamental no espectro de frequência. Porém

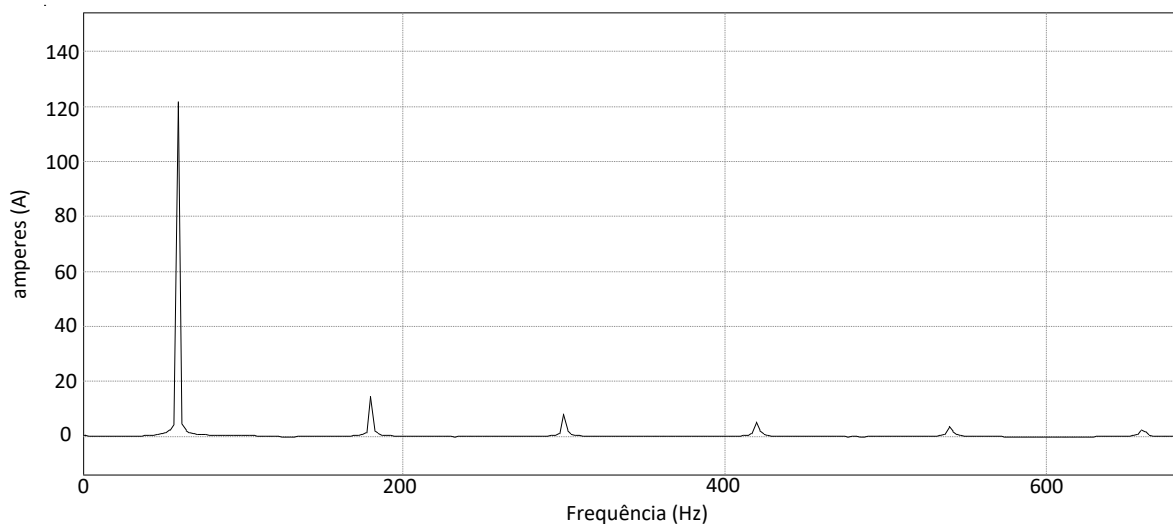
as componentes harmônicas ainda se mostram presentes para o ultimo intervalo, resultando em oscilações na corrente, como mostram as Figuras 35 e 36.

Figura 35: Corrente da carga entre 0,8 e 1,2 segundos.



Fonte: Autoria própria

Figura 36: Espectro da corrente da carga entre 0,8 e 1,2 segundos.

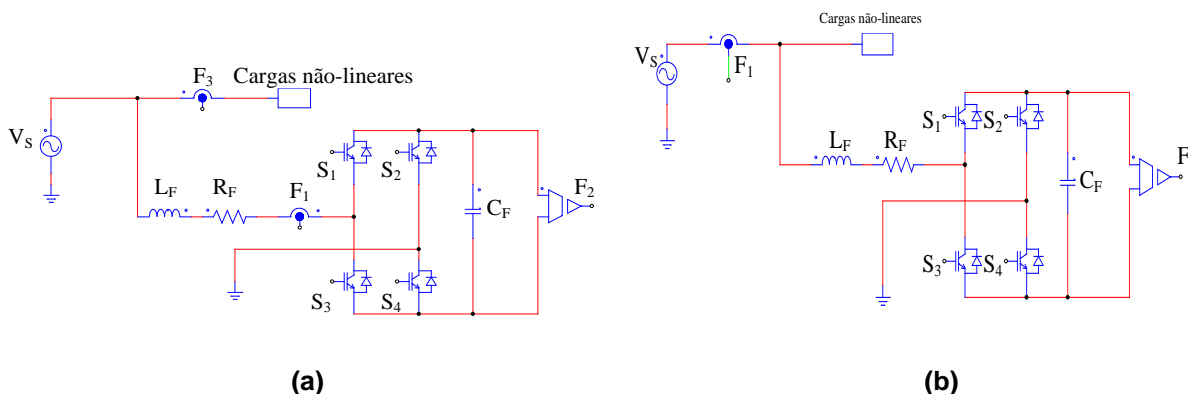


Fonte: Autoria própria

Pelas Figuras apresentadas anteriormente, fica evidente que a carga simulada tem correntes harmônicas que devem ser mitigadas pelo filtro ativo.

A estrutura do FAP para atuar na compensação dessa carga é diferente em cada tipo de controle, convencional e simplificado. Assim a Figura 37 mostra a ligação do conversor com a carga e a rede em ambos os casos.

Figura 37: Simulação da estrutura física do conversor (a) para controle convencional e (b) para controle simplificado.



Fonte: Autoria Própria

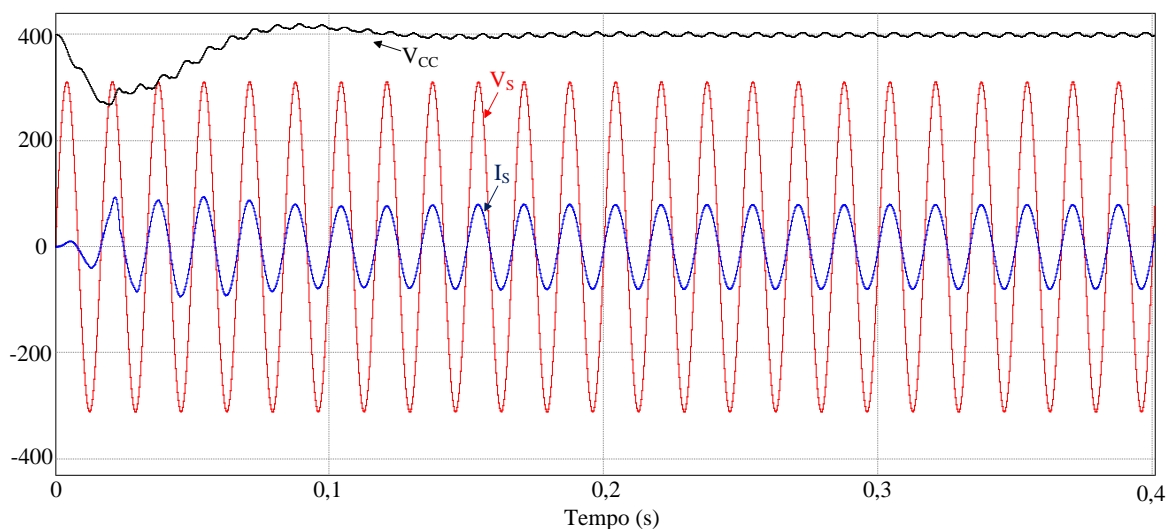
Na Figura 37 (a) e (b), o sensor F_2 monitora a tensão do barramento CC para que o controle de tensão possa atuar no caso de carga ou descarga do capacitor C_F . Já o sensor F_1 é o responsável por monitorar a corrente (para Figura 37a) de saída do filtro ativo e (para Figura 37b) da rede. As chaves S_1 até S_4 são do inversor de tensão em ponte e são comandadas pelo controle de corrente em ambos os casos. A fonte de tensão V_s representa a rede elétrica conectada a cargas não-lineares representada por um bloco. Os valores respectivos dos elementos passivos, R_F , L_F e C_F são $0,05\Omega$, 2 mH e 2 mF .

3.1 Formas de onda: corrente e tensão da rede e tensão do barramento CC.

Já apresentados o tipo de carga e estrutura dos conversores do FAP, agora pode-se observar qual o comportamento de cada modelo de controle e sua atuação na rede. Dessa maneira, deve-se analisar as formas de onda da corrente e tensão da rede atentando-se a algumas características específicas como: formato senoidal da corrente, defasagem entre corrente e tensão e o tempo necessário para correção das distorções e compensação dos reativos.

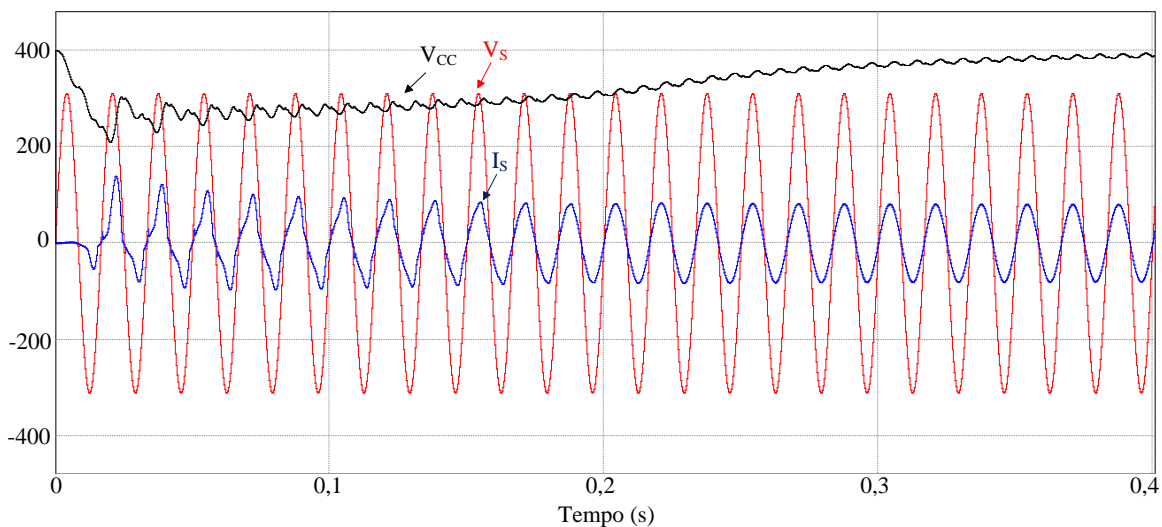
As Figuras 38, 39, 40 e 41 ilustram respectivamente as formas de onda da corrente da rede e tensão com métodos simplificado sem filtro, com FPB 1ª ordem, média móvel e método convencional. Neste momento apenas com carga no intervalo entre 0 e 0,4 segundos, ou seja, antes dos comandos das chaves K_1 e K_2 .

Figura 38: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



Fonte: Autoria própria

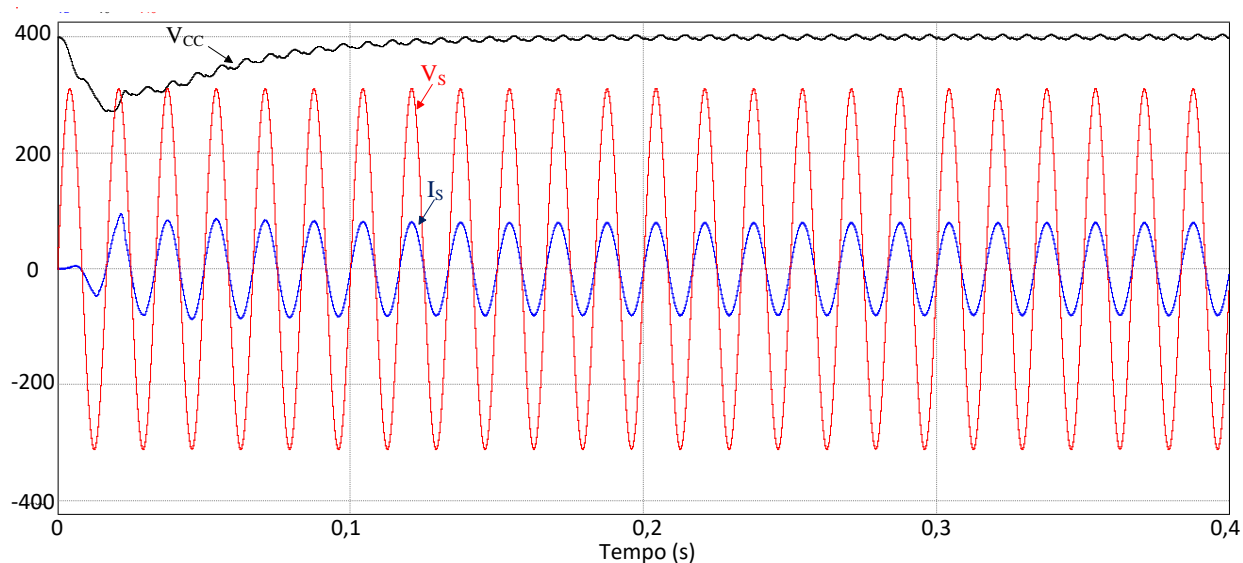
Figura 39: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



Fonte: Autoria própria

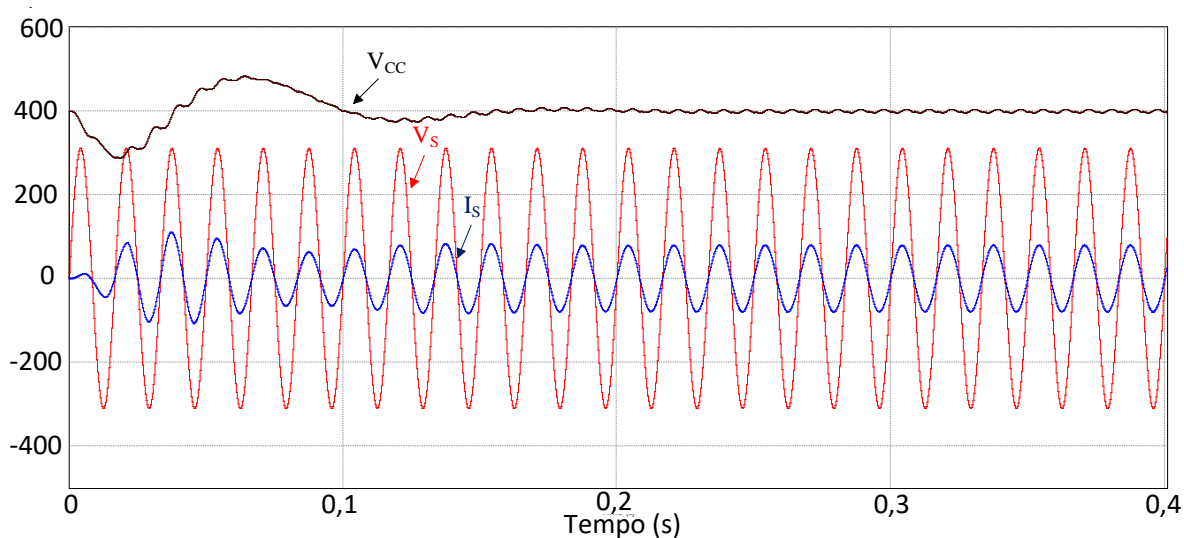
Com a atuação do filtro ativo já é perceptível a redução das distorções harmônicas da corrente, sendo que as taxas de distorções diminuíram para 1,12% na Figura 38 e 0,89% para a Figura 39.

Figura 40: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria

Figura 41: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0 e 0,4 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.

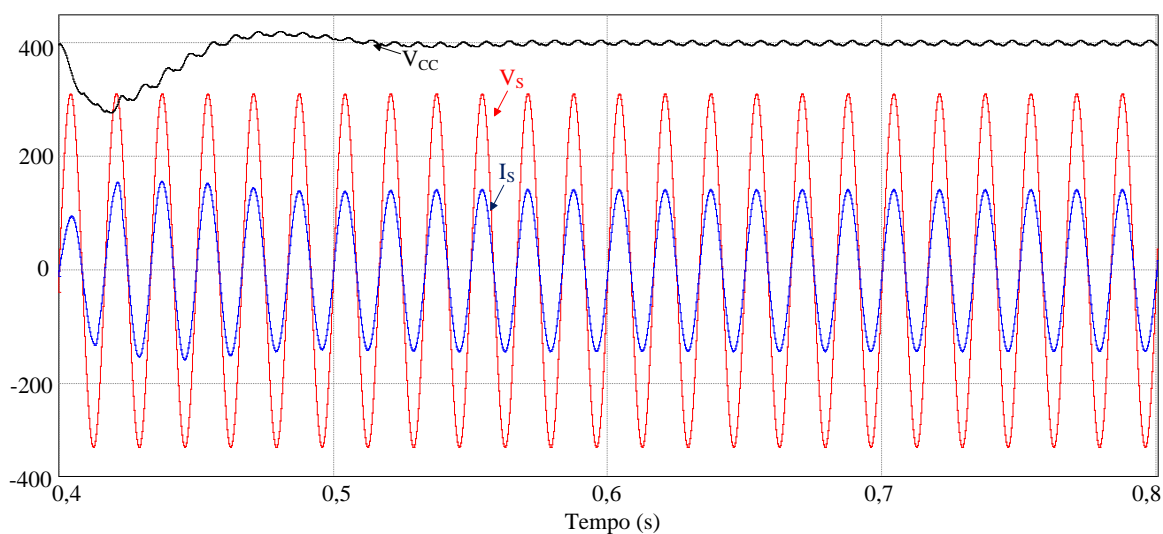


Fonte: Autoria própria

Nas figuras apresentadas anteriormente V_s e I_s e V_{CC} são respectivamente, tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC. Para os modelos com filtro média móvel e o convencional as taxas de distorção são de 0,85% e 1,16%.

Agora um degrau de carga será feito na rede, possibilitando analisar a reação do FAP após a variação de carga enquanto o sistema operava em regime, perturbando a estabilidade do conjunto. Como explicado anteriormente, essa carga é conectada através da chave K_2 após 0,4 segundos, as Figuras 42, 43, 44 e 45 mostram na mesma sequência anterior, as formas de onda da corrente e tensão da rede durante o intervalo de 0,4 e 0,8 segundos.

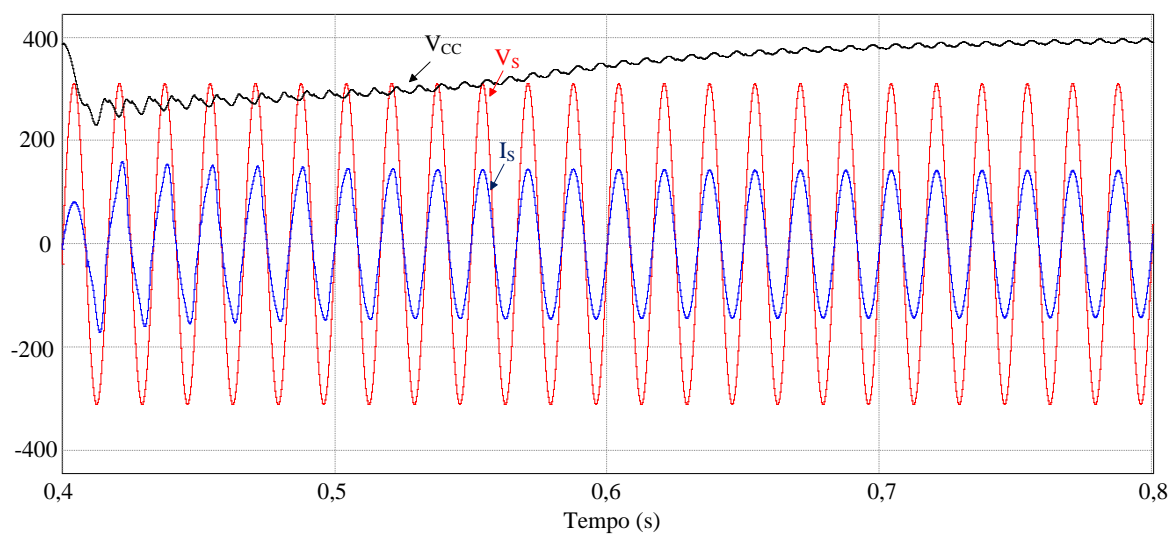
Figura 42: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



Fonte: Autoria própria.

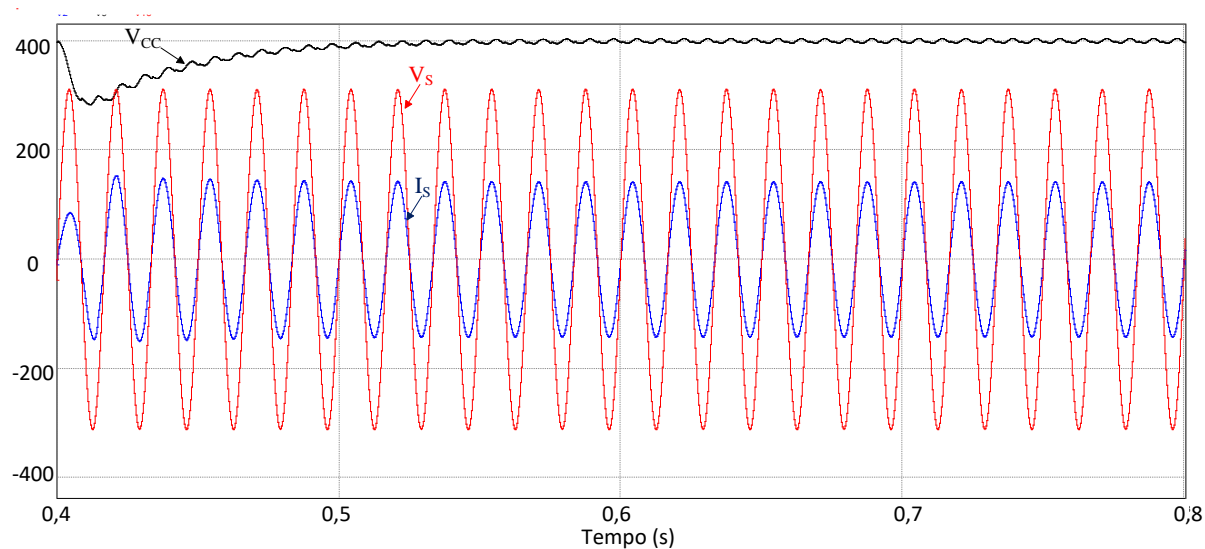
Nesse intervalo de simulação, pela Figura 34 nota-se que a amplitude das componentes harmônicas também variou, o que reflete na porcentagem de distorção da corrente após a atuação do filtro ativo. No mesmo período as porcentagens para cada modelo foram respectivamente de 0,71%, 0,58%, 0,57% e 0,77%. Esses valores estão na mesma sequência de apresentação das simulações de cada método de controle aplicado ao FAP.

Figura 43: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



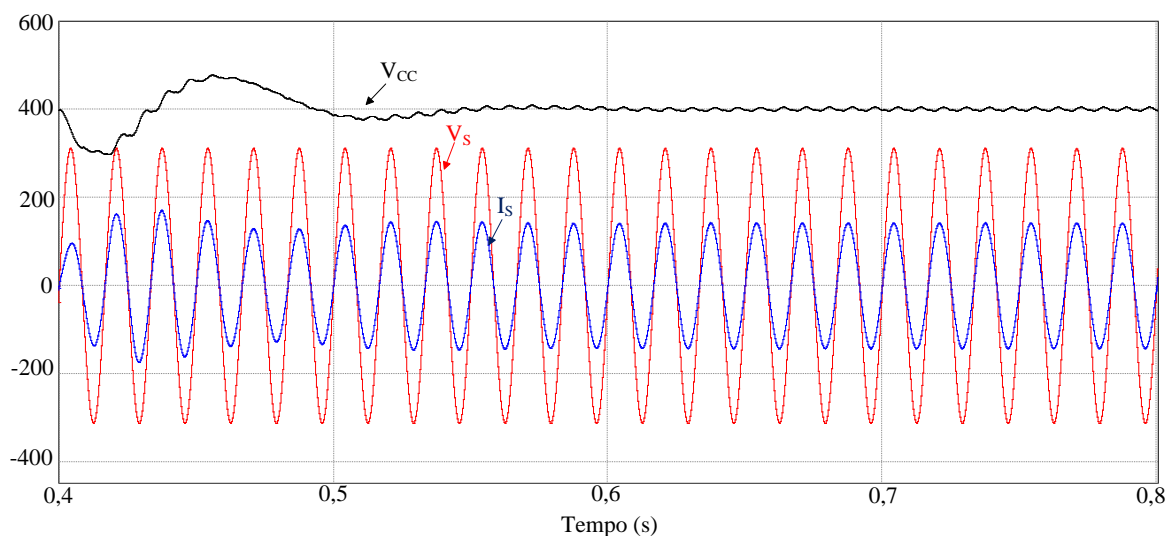
Fonte: Autoria própria.

Figura 44: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

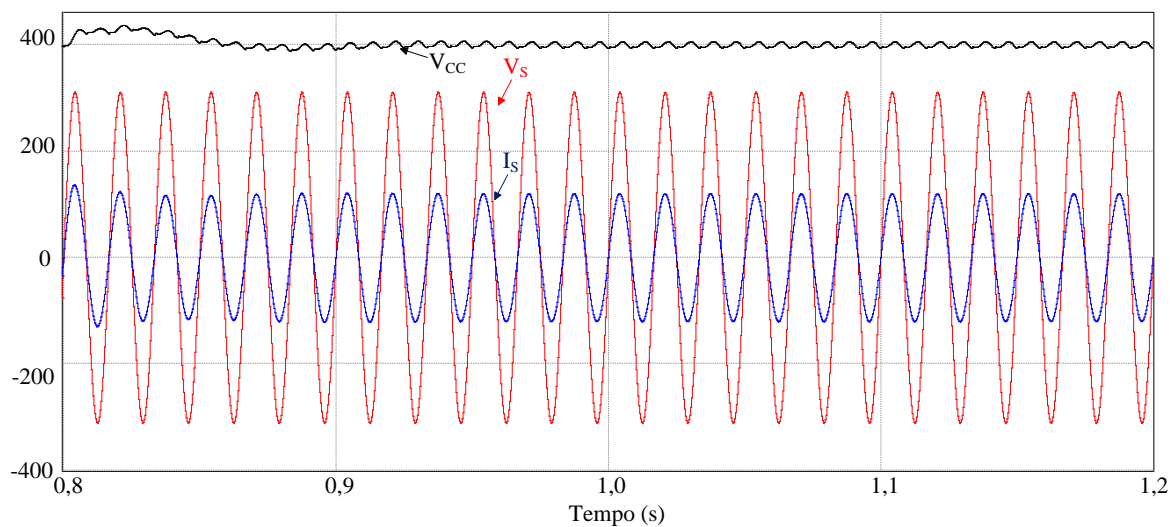
Figura 45: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,4 e 0,8 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.



Fonte: Autoria própria.

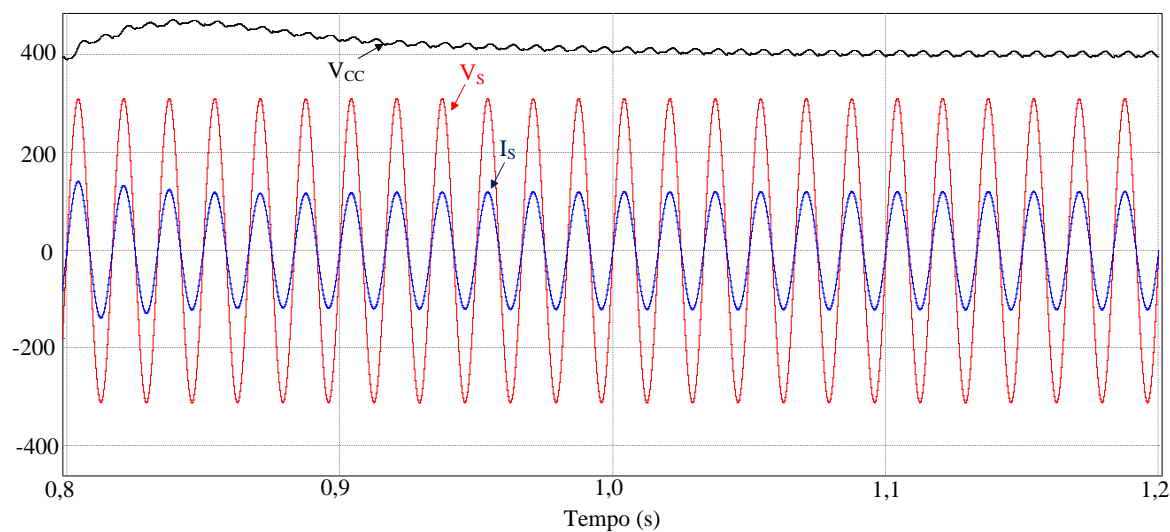
Com a entrada de carga na rede houve aumento na amplitude da corrente fornecida, ocasionando na redução da tensão do capacitor C_F . Importante verificar que apesar desta variação, os métodos mantiveram as distorções controladas e a corrente em fase com a tensão da rede. A diferença principal é no tempo que o controle necessitou para reagir e compensar as parcelas harmônicas. Para acrescentar fatores na análise, será simulada a saída de carga, mostrada no intervalo de 0,8 a 1,2 segundos, que resulta em um aumento de tensão no capacitor. Pelas Figuras 46, 47, 48 e 49 pode-se observar a reação dos modelos de controle a essa situação de aumento de tensão do barramento.

Figura 46: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



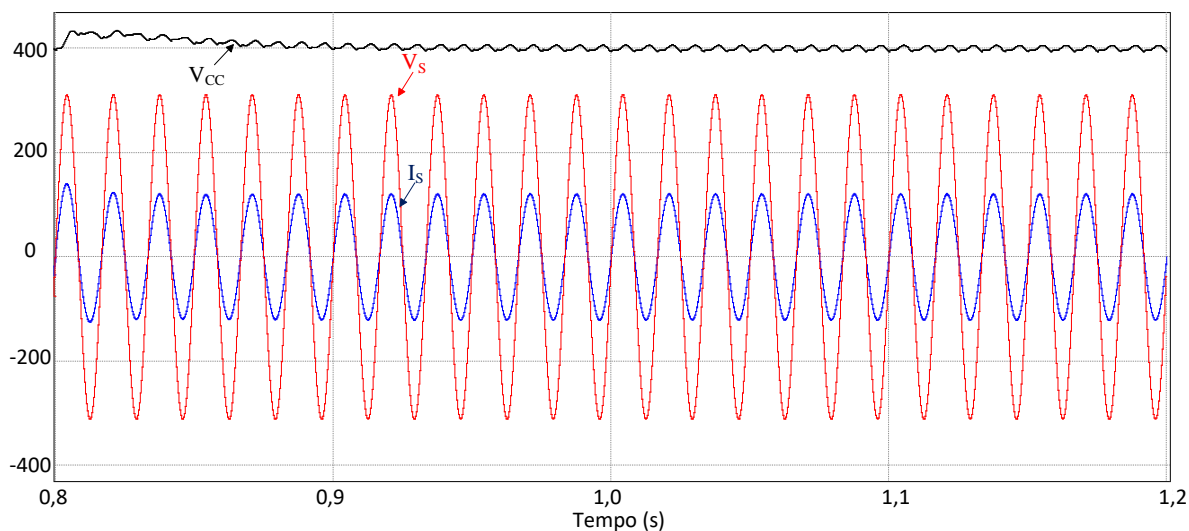
Fonte: Autoria própria.

Figura 47: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



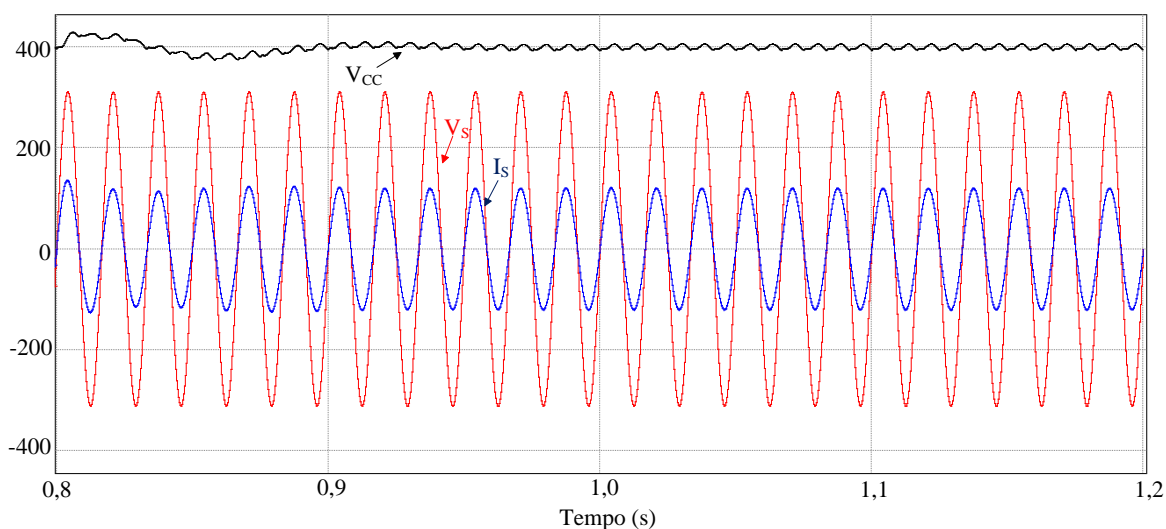
Fonte: Autoria própria.

Figura 48: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

Figura 49: Tensão e corrente da rede e tensão do barramento CC durante 0,8 e 1,2 segundos utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.



Fonte: Autoria própria.

Na saída de carga o filtro manteve o comportamento e fez o ajuste da amplitude conforme a necessidade do sistema. Esse fato pode ser visto em todos os métodos aplicados, além do nível de distorção que permaneceu praticamente o mesmo após a correção efetuada pelo filtro ativo. Pode-se confirmar esses dados a

partir da tabela 4, que apresenta os valores de distorção harmônica em cada período analisado para cada método de controle aplicado.

Tabela 4: Taxas de distorção harmônica total.

Grandeza medida	Intervalos de simulação		
	Entre 0 e 0,4 segundos	Entre 0,4 e 0,8 segundos	Entre 0,8 e 1,2 segundos
Corrente da carga	25%	14,60%	16,46%
Corrente da rede com FAP:			
Simplificado sem Filtro	1,12%	0,71%	0,85%
Simplificado c/ FPB 1ªOrdem	0,89%	0,58%	0,49%
Simplificado c/ FMM	0,85%	0,57%	0,49%
Convencional	1,16%	0,77%	0,85%

Fonte: Autoria própria.

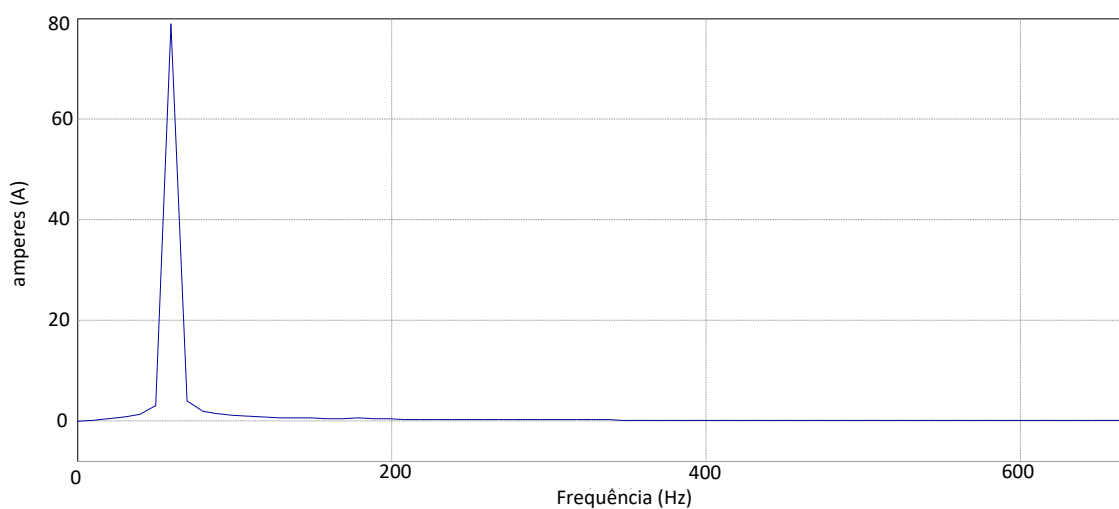
Comparando o aspecto do tempo de resposta dos modelos de controle é notável que o filtro passa baixa de primeira ordem se mostrou mais lento entre todos. Resultado que já era esperado, uma vez que nas seções anteriores as simulações indicavam esse comportamento. Para as outras três configurações, percebe-se uma resposta aproximadamente igual, com uma leve vantagem do modelo com FMM. Por exemplo na situação inicial, ele demorou cerca de 0,05 segundos para suprimir as harmônicas, visto na Figura 40, mas demorou aproximadamente 0,15 segundos para regular a tensão do barramento, resultado muito próximo ao do convencional, da Figura 41. Já o simplificado, apesar do desempenho semelhante, percebe-se que o ajuste da tensão do barramento demora alguns instantes a mais, necessitando de quase 0,2 segundos para estabilizar, mas ainda assim são bem próximos. Observando os casos para degrau de carga e saída de carga, os métodos de controle mantiveram seus intervalos de tempo necessários para efetuar as correções na corrente. Essa é uma característica importante, já que é desejável que o FAP opere da mesma forma independente da variação de carga no PAC. Porém é importante notar que no degrau de carga a tensão V_{CC} em alguns instantes ficou menor que a

tensão da rede. Neste intervalo a corrente da rede é levemente deformada, pois o controle do FAP está carregando o capacitor do barramento novamente.

Para comprovar que as componentes harmônicas da carga foram suprimidas, serão mostrados os espectros de frequência da corrente da rede com atuação do filtro ativo diferenciando cada estratégia de controle. Assim pode-se distinguir a amplitude das componentes depois da ação do equipamento.

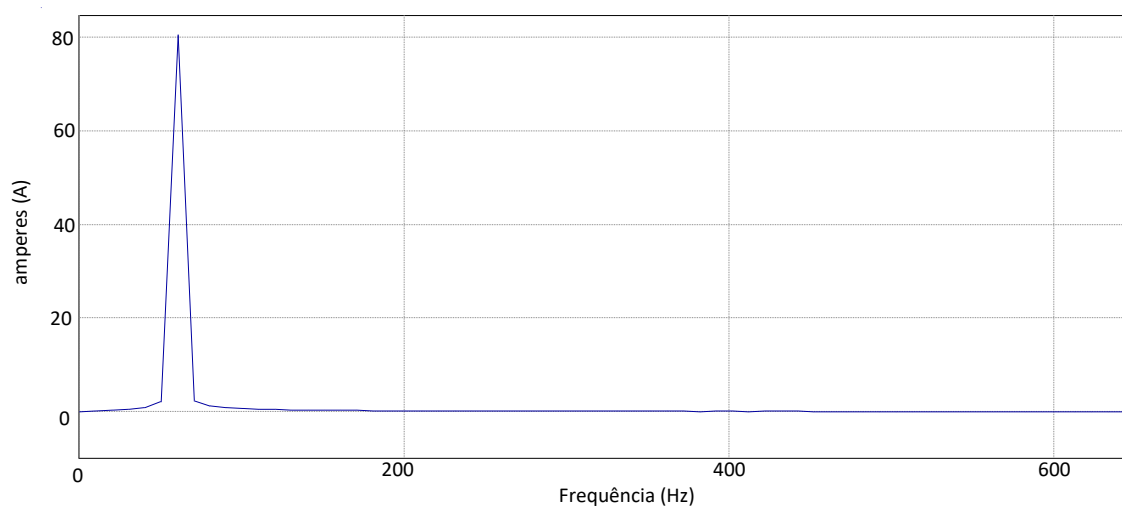
Nota-se que é essencial retirar o espectro da corrente no mesmo intervalo de tempo em todos os casos, devido ao método de cálculo do software, dessa forma o período de análise será a partir de 0,3 segundos depois do transitório em todos as simulações, tempo necessário para que o sistema esteja estável. Seguindo a ordem das figuras mostradas anteriormente, de acordo com o tipo de controle, as Figuras 50, 51, 52 e 53 detalham os espectros de frequência da corrente da rede em cada caso, durante o primeiro intervalo de simulação.

Figura 50: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



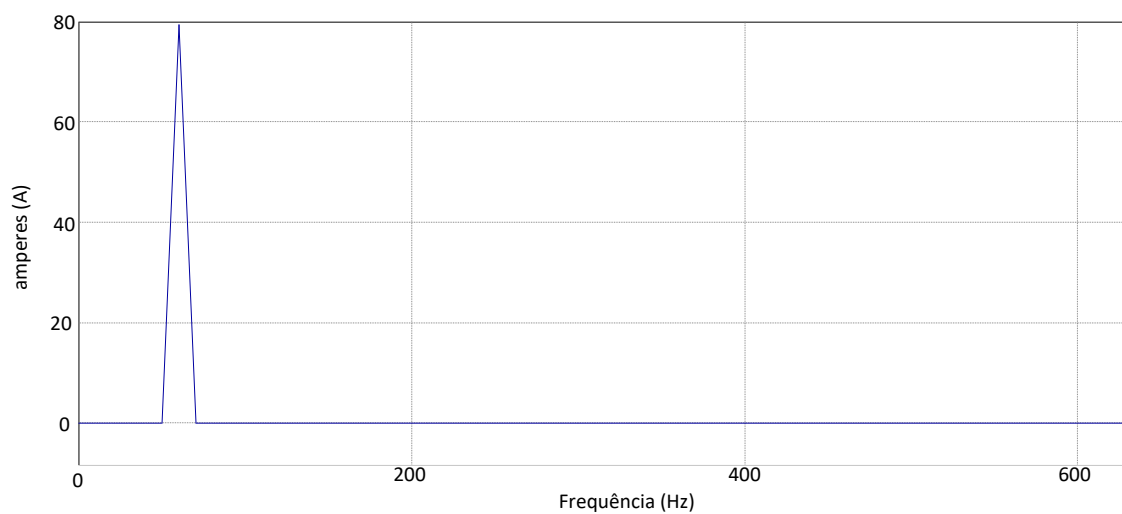
Fonte: Autoria própria.

Figura 51: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



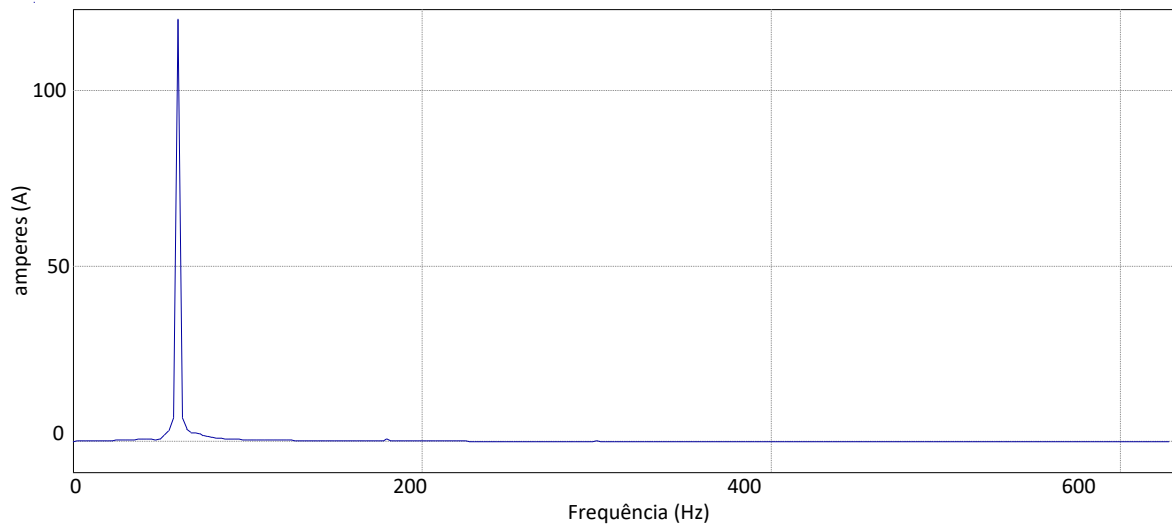
Fonte: Autoria própria.

Figura 52: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

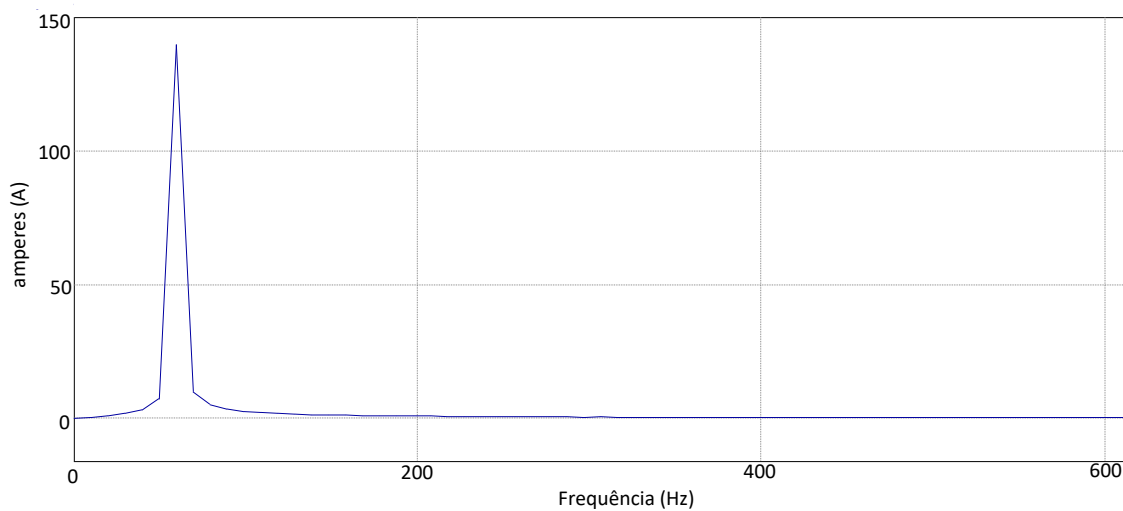
Figura 53: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0 e 0,4 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.



Fonte: Autoria própria.

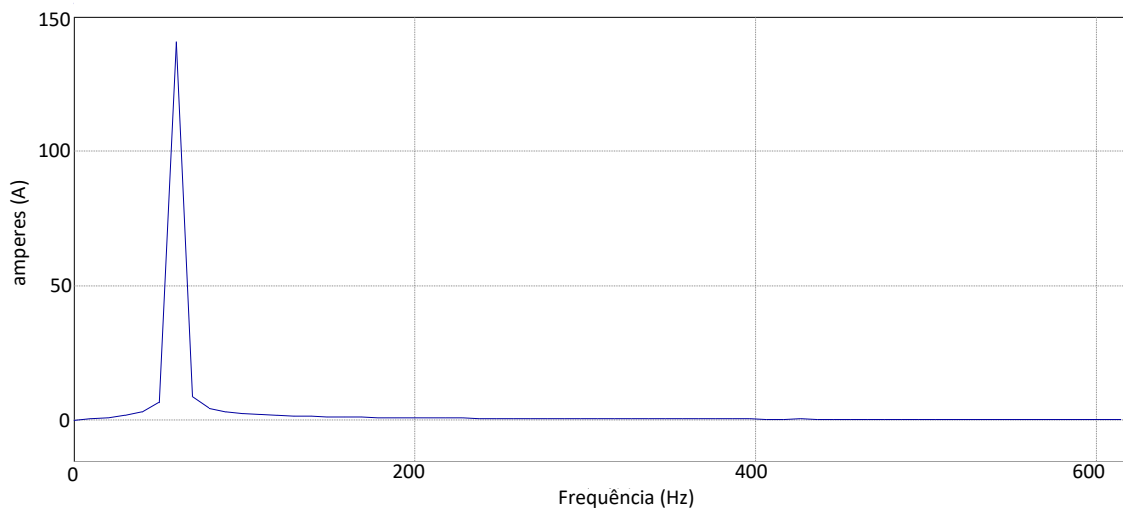
Pelas imagens dos espectros, verifica-se que as componentes harmônicas que estavam presentes na corrente da carga, foram suprimidas restando apenas a componente fundamental em 60Hz. Segundo a tabela 3, no próximo intervalo de simulação, o qual mostra o comportamento do sistema após o degrau de carga também esperasse que o filtro compense as correntes harmônicas. As Figuras 54, 55, 56 e 57 mostram o espectro da corrente da rede durante o período de 0,4 e 0,8 segundos da simulação.

Figura 54: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



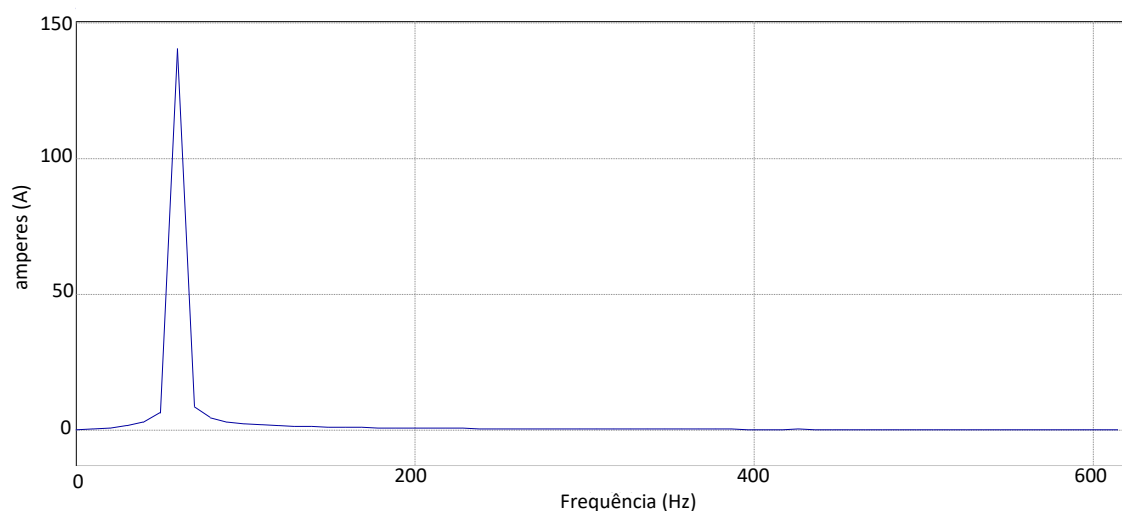
Fonte: Autoria própria.

Figura 55: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



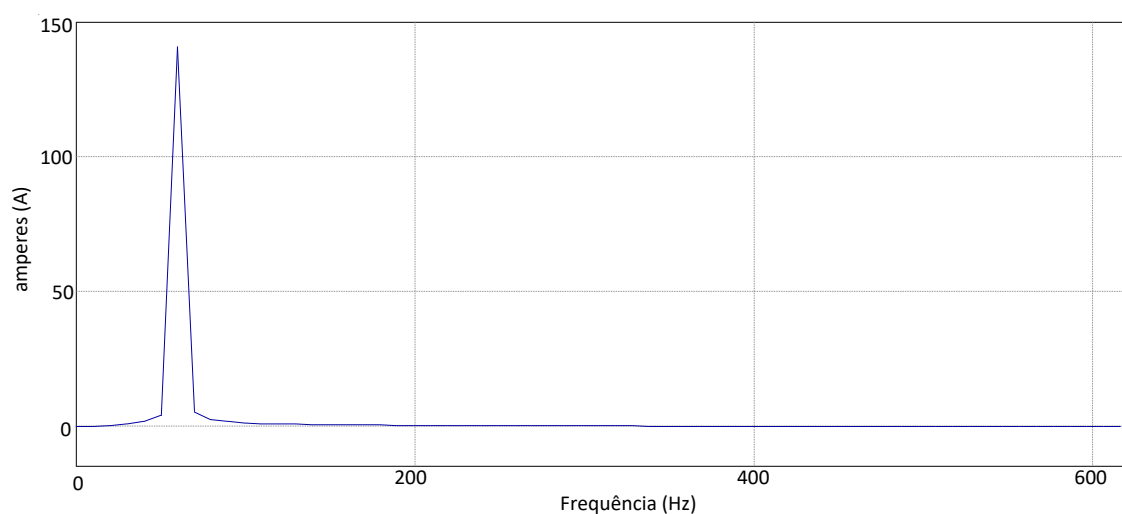
Fonte: Autoria própria.

Figura 56: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

Figura 57: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,4 e 0,8 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.

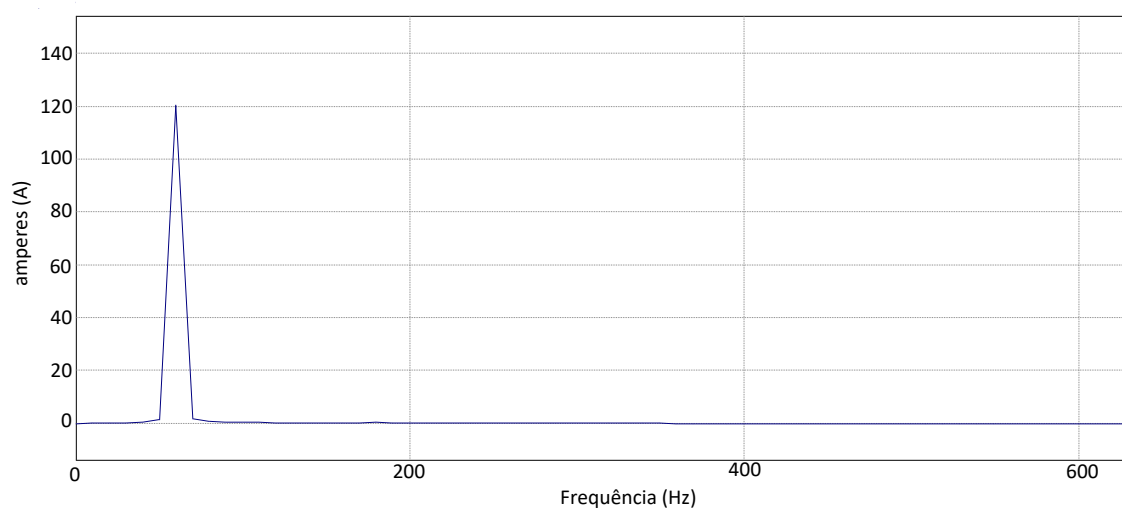


Fonte: Autoria própria.

Como observado no intervalo inicial, o FAP manteve seu funcionamento atenuando as componentes harmônicas após o degrau de carga em todos os casos simulados. Seguindo apresentando os resultados, as Figuras 58, 59, 60 e 61, mostram

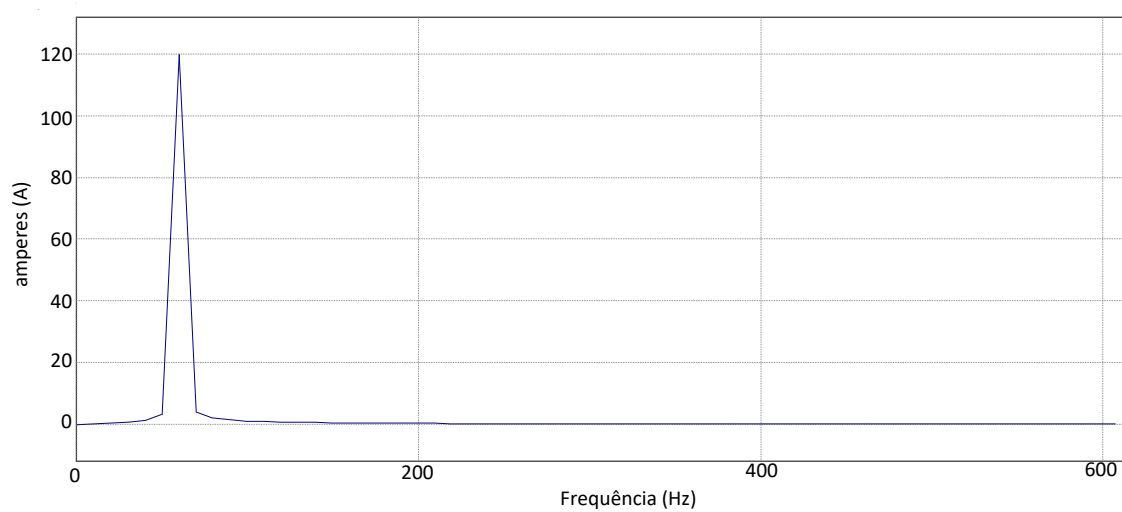
os espectros da corrente do intervalo final de simulação, para comprovar a atuação do filtro ativo.

Figura 58: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado sem filtro.



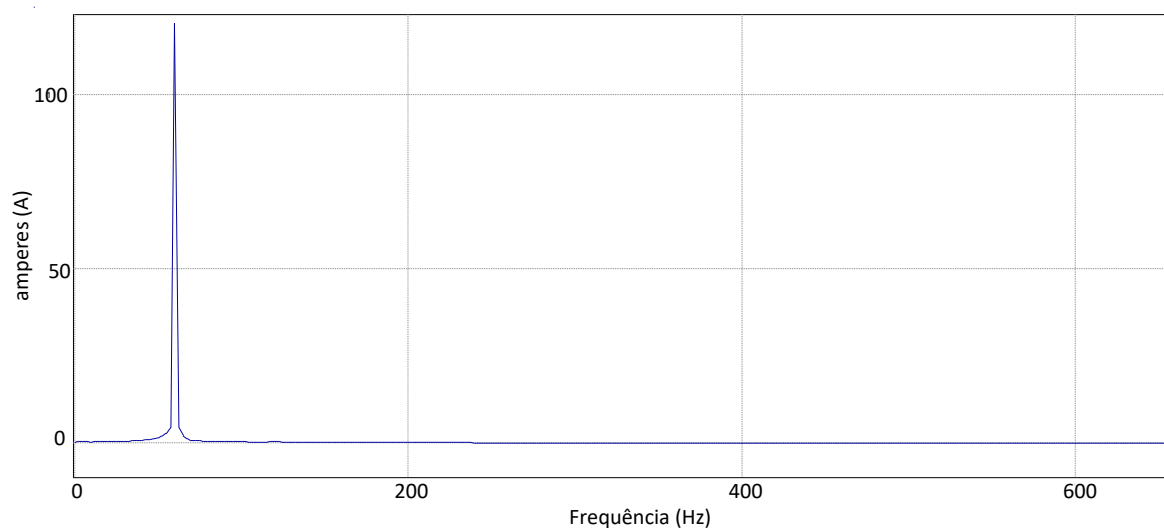
Fonte: Autoria própria.

Figura 59: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FPB 1ª ordem.



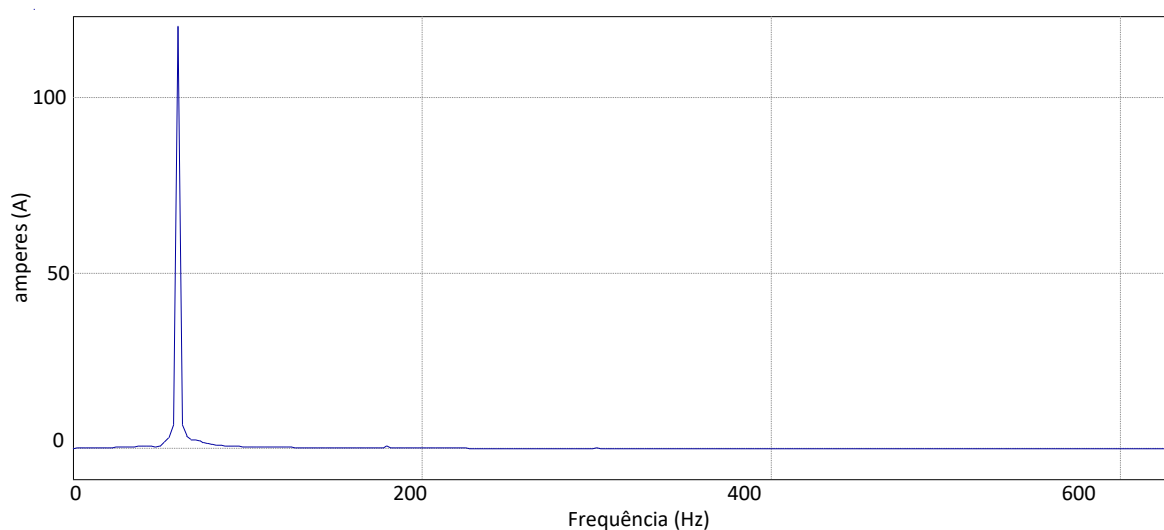
Fonte: Autoria própria.

Figura 60: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle simplificado com FMM.



Fonte: Autoria própria.

Figura 61: Espectro de frequência da corrente da rede entre 0,8 e 1,2 segundos, utilizando FAP com controle convencional baseado no método SRF.



Fonte: Autoria própria.

Anteriormente, observou-se que a corrente da rede ficou muito próxima de uma forma de onda senoidal como é desejado. Visto que as taxas de distorções harmônicas calculadas em cada caso foram menores que 2%, valor dentro do permitido para os órgãos regulamentadores. Juntando essas informações com as figuras dos espectros harmônicos é provado que houve a eliminação quase que total

dessas componentes. Porém a partir das imagens fica difícil distinguir qual teve melhor atenuação, justamente por serem quase idênticas. Mas pela porcentagem de distorção calculada, pode-se dizer que utilizar um filtro passa baixas no controle melhora a atenuação das componentes.

4 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita a discussão sobre a qualidade de energia do sistema elétrico com foco nos efeitos causados pelas distorções harmônicas. Assim como os problemas causados nos equipamentos elétricos, também foram apresentadas formas de correção dessas distorções com diferentes topologias de filtros, citadas no capítulo 1.

O trabalho teve como principal objetivo apresentar uma proposta de aprimoramento de um método de controle simplificado dos filtros ativos de potência monofásico. Buscando entender melhor os FAPs, foi realizado o estudo de sua estrutura desde as topologias de inversores de tensão a variados tipos de métodos de controle dos filtros.

O método de controle simplificado, estudado no capítulo 2, tem como principal vantagem um baixo custo em relação aos outros. Porém sua resposta dinâmica e atuação no sistema elétrico são mais lentas que dos métodos mais caros e complexos apresentados neste trabalho. Por este fato, é importante tratar de melhorar seu desempenho já que para indústria o fator econômico é levado em consideração na aplicação de novos equipamentos. Assim foi pensado para este método a proposta de melhorar sua resposta dinâmica com utilização de filtros em sua estratégia de controle. Para os casos apresentados foram discutidos como esses elementos afetariam a malha de tensão já em funcionamento com o controlador PI. A partir da análise da resposta em frequência via diagrama de Bode constatou-se qual era a região de operação e atenuação das oscilações. Além dessa análise, a resposta ao degrau unitário também foi realizada, buscando verificar a estabilidade do sistema, sobressinal e tempo de resposta comprovando o funcionamento do sistema e colaborando também com a análise da dinâmica. A partir disso o método de controle com filtro média móvel se mostrou mais eficaz, em relação aos outros no sentido de melhorar a dinâmica do sistema e atenuação das componentes. Dessa forma a ação de controle pode ser mais veloz sem que a oscilação do barramento CC seja introduzida no cálculo da corrente de referência do FAP.

No terceiro capítulo deste trabalho foram apresentadas as simulações do sistema físico (rede, carga e filtro ativo) para examinar o funcionamento e estudar o comportamento do conversor, observando as vantagens e desvantagens de cada

método simulado. A primeira conclusão é que o FAP mesmo com alterações conseguiu realizar suas funções, compensando harmônicos e reativos, comprovados pelos dados da tabela 4. Comparando alguns resultados obtidos no capítulo 2.4.3 em relação ao capítulo 3, constatou-se que os modelos de controle de tensão utilizando filtros passa baixas tiveram desempenho um pouco inferior nas simulações do circuito. Principalmente no quesito do tempo de resposta para regular a tensão do barramento CC, onde principalmente o modelo com filtro primeira ordem teve resposta bem mais lenta. Já para o modelo com filtro média móvel, mesmo tendo essa piora no desempenho ele conseguiu levar vantagem em relação ao método simplificado sem alterações e o convencional. Ainda mais tendo em conta que foi o modelo de controle que melhor suprimiu as parcelas harmônicas.

No geral, o objetivo deste trabalho era conseguir alterar a estrutura de controle do filtro ativo para que seu desempenho fosse similar ao do método convencional. Pelos resultados obtidos, pode-se afirmar que nesse sentido o comportamento do modelo utilizando o filtro média móvel na estrutura foi satisfatório e até sutilmente melhor que o método convencional testado neste trabalho, podendo ser uma alternativa para correções de problemas com qualidade de energia elétrica do cotidiano das pessoas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, módulo 8, 16/12/2008 Resolução 345/2008 da ANEEL.

AKAGI, H. “New Trends in Active Filters for Power Conditioning” in IEEE Trans on Industrial Appls Nov./Dec.1996. Vol.32, No.6, pp.1312-1322´

AKAGI, H.; KANAGAWA, Y. e NABAE, A (1983), Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three Phase Circuits - Int. Conf..Power Electronics, Tóquio.

AKAGI, H.; KANAGAWA, Y. e NABAE, A (1984), Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components, IEEE Trans. on Inçl. Aplic. Vol. IA-20, 003, Maio/Junho.

BACON, V. D.; SILVA, S. A. O.; MODESTO, R. A. UPS Line-Interactive Monofásica para Aplicações de Baixo Custo Utilizando uma Estratégia de Controle Simplificada. In: 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2012, Fortaleza-Ceará. INDUSCON 2012, 2012.

BRAGA, Mateus Freitas. Projeto e Simulação de um Filtro Híbrido Monofásico para Correção do Fator de Potência e Compensação Harmônica em uma Rede Industrial. 110p. Dissertação (Mestrado acadêmico) – Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora. 2017

CAMPANHOL, L. B. G.; SILVA, S. A. O.; GOEDEL, A. Filtro Ativo de Potência Paralelo Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro-Fios. Eletrônica de Potência (Impresso), v. 18, p. 1-11, 2013

CAMPANHOL, L. B. G.; GOEDEL, A.; SILVA, S. A. O.; NASCIMENTO, C. F.; Utilização de Rede Neural Artificial na Geração das Correntes de Compensação de

um Filtro Ativo de Potência Paralelo Trifásico. In: Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2011, São João del-Rei – MG, 2011.

CERQUEIRA, E.; MELLO, C.; POPPI, R. J.; KUBOTA LT. Utilização de filtros com transformada de Fourier no processamento de sinais analíticos. Química Nova, Brasil, v. 23, n.5, p. 690-697, 2000.

DE BARROS, ODAIR ; AMORIM, THIAGO SILVA ; NETO, ANSELMO FRIZERA ; ENCARNACAO, LUCAS FRIZERA . Novel active filter selective control strategy using fourier linear combiners. In: 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018, Niteroi. 2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE), 2018. p. 1.

FENILI, M. P. Estudo e Implementação de um Filtro Ativo Paralelo Monofásico de 8kVA. 2007. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2007.

FERACIN, Angelo Neto. Filtros Ativos Paralelos aplicados a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios. 148 páginas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, 2009.

FEYH, A. R.; CAMARGO, R. F. ; RECH, C. . Análise do Problema de Variação de Tensão no Barramento CC de um Conversor Multinível NPC Trifásico a Quatro Fios para Aplicações em Média Tensão. In: XV Seminário de Iniciação Científica , XII Jornada de Pesquisa e VIII Jornada de Extensão, 2007, Ijuí. XV Seminário de Iniciação Científica , XII Jornada de Pesquisa e VIII Jornada de Extensão, 2007.

GHETTI, F. T.; Barbosa, P. G; Braga, H. A. C.; Andre A. Ferreira. Estudo comparativo de técnicas de controle de corrente aplicadas a filtros ativos shunt. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito - MS. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010.

GHETTI, F. T.; Barbosa, P. G.;Braga, H. A. C.; Andre A. Ferreira. Estudo de desempenho de um filtro ativo shunt construído a partir da topologia de conversores

multiníveis modulares, MMC. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande, PB. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, 2012.

IEEE Std. 519-1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," June 1992.

LAM, C.-S.; WONG, M.-C. Design and Control of Hybrid Active Power Filters. : Springer, 2014.

Lima, A. G. G. and Greenhalgh, A. B. (1993). Active Filters and the Zero Sequence Component, Proc. Of the II Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência – COBEP, Vol.1, pp. 210224.

MALVEZZI, Victor Belieiro. Estudo e projeto de controladores aplicados na malha de controle de corrente de um filtro ativo de potência paralelo. 2014. 133 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2014.

MIKKILI, S.; PANDA, A. K.; $I_d - I_q$ Control Strategy for Mitigation of Current Harmonics with PI and Fuzzy Controllers. In: IEEE International Conference on Power and Energy Systems, 2011, Madras, 2011.

MODESTO, R. A. Método de Compensação Ativa de Potência Aplicado a um Filtro Ativo Paralelo Monofásico. 2007. 103 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

Modesto, R. A. Estudo, Projeto e Implementação de Sistemas UPQC/UPS Trifásicos Aplicados no Condicionamento Ativo de Energia Elétrica. 2015. 243 f. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo – USP, 2015.

MODESTO, R. A.; BARRIVIERA, R.; SILVA, S. A. O.; OLIVEIRA JUNIOR, A. A. A Simplified Strategy Used to Control the Output Voltage and the Input Current of a

Single-Phase Line-Interactive UPS System. In: Brazilian Power Electronics Conference, 2013, Gramado-RS. COBEP 2013, 2013. p. 1-6.

NILSSON, James William; RIEDEL, Susan A. Circuitos elétricos. 8. Ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2009.

ORTMANN, Marcio S.; MUSSA, S. A. Filtro Ativo Trifásico Paralelo com Controle no Sistema de Referência Síncrona. In: (INDUSCON 2008) VIII Conferência Internacional em Aplicações Industriais, 2008, Poços de Caldas - MG. (INDUSCON 2008) VIII Conferência Internacional em Aplicações Industriais, 2008.

POTTKER, F.; Correção do Fator de Potência para Instalações de Baixa Potência Empregando Filtros Ativos. 2000. 210p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2000.

POTTKER, F.; Filtros Ativos Monofásicos para Instalações de Média Potência. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado, 2004.

POTTKER, F.; LINDEKE, D.; MUSSA, S. A.; BARBI, Ivo. Filtro Ativo Monofásico de 1kVA com Controle Digital Utilizando DSP. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado, 2004.

REIS, ALEX; LIMA, MICHELLY S.; DE OLIVEIRA, JOSE C.; MOURA, LEANDRO P. Comparative analysis between harmonic distortion mitigation techniques produced by wind power inverting units. In: 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2018, Niterói. 2018 Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE), 2018. p. 1.

RIBEIRO, E. R.; Filtros Ativos Série para Compensação de Harmônicos de Tensão. 2003. 203p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Santa Catarina, 2003.

SILVA, S. A. O.; Novochadlo R.; MODESTO, R. A. Single-Phase PLL Structure Using Modified p-q Theory for Utility Connected Systems. In: IEEE 39th Power Electronics

Specialists Conference, 2008, Rhodes Island. IEEE 39th Power Electronics Specialists Conference, 2008.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. Análise das Distorções Harmônicas – Estudo de Caso de um Sistema Industrial. 2009. 127p. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.