

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

LUIS GUSTAVO PINHEIRO ROTELLI

**ESTRATÉGIA DE CONTROLE SIMPLIFICADO APLICADO AO FILTRO ATIVO DE
POTÊNCIA TRIFÁSICO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

LUIS GUSTAVO PINHEIRO ROTELLI

**ESTRATÉGIA DE CONTROLE SIMPLIFICADO APLICADO AO FILTRO ATIVO DE
POTÊNCIA TRIFÁSICO**

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
2020



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Luis Gustavo Pinheiro Rotelli

Estratégia de controle simplificado aplicado ao filtro ativo de potência trifásico

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 10:30hs do dia 19/11/2020 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). Murilo da Silva - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Paulo Junior Silva Costa - (Membro)

AGRADECIMENTOS

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

Aos meu pais, Rodrigo e Sarah, que sempre estiveram do meu lado, me apoiando e tornando tudo isso possível.

Meus avós maternos Jair e Geni e paternos Reinaldo e Regina, que junto aos meus pais não me deixaram desistir em nenhum ponto de dificuldade.

À minha namorada, Thairine Yumi, por toda ajuda e compreensão nesse momento.

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

Agradeço também a todo corpo docente da universidade que contribuiu imensamente nessa jornada de aprendizado.

Enfim, a todos que por algum motivo contribuíram para a realização desse trabalho.

RESUMO

ROTELLI, L. G. P. **Estratégia de Controle Simplificado Aplicado ao Filtro Ativo de Potência Trifásico**. 2020. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

O trabalho consiste em um projeto e estudo de um filtro ativo de potência paralelo trifásico (FAP), o mesmo tem a função de gerar uma corrente de compensação que quando injetada na rede irá suprimir as correntes harmônicas na fonte e compensar a energia reativa, melhorando a qualidade de energia elétrica. O FAP utiliza-se de uma estratégia de controle simplificado que necessita de menos sensores e menos cálculos se comparado aos FAPs que utilizam estratégias de controle convencional. Entretanto a resposta dinâmica da estratégia simplificada é mais lenta o que será foco de estudo neste trabalho para propor soluções para esta deficiência.

Palavras-chave: Filtro ativo de potência. Qualidade de energia. Distorções harmônicas.

ABSTRACT

ROTELLI, L. G. P. **Simplified Control Strategy Applied to Three Phase Active Power Filter**. 2020. 55 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

The work consists of a project and study of a three-phase parallel power active filter (FAP), it has the function of generating a compensation current that, when injected in the network, will suppress the harmonic currents in the source and compensate the reactive energy, improving the quality of electricity. The FAP uses a simplified control strategy that requires fewer sensors and less calculations when compared to FAPs that use conventional control strategies. However, the dynamic response of the simplified strategy is slower, which will be the focus of study in this work to propose solutions to this deficiency.

Keywords: Active power filter. Power quality. Harmonic Distortions.

LISTA DE SIGLAS

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

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Carga 1 conectado à rede	16
Figura 2: Correntes da carga 1 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente	17
Figura 3: Espectro harmônico da corrente da carga 1 da fase a (i_a).....	17
Figura 4: Carga 2 conectado à rede	18
Figura 5: Correntes da carga 2 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente	18
Figura 6: Espectro harmônico das corrente da carga 2 nas fase a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente	19
Figura 7: Carga 3 conectado à rede	20
Figura 8: Correntes da carga 3 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente	20
Figura 9: Espectro harmônico das corrente da carga 3 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente	21
Figura 10: Inversor do FAP (em destaque) conectado no PAC.....	23
Figura 11: Esquema de um FAP com controle convencional	26
Figura 12: Esquema de um FAP com controle simplificado	27
Figura 13: Diagrama de blocos Filtro Média Móvel	29
Figura 14: Diagrama em blocos do sistema STF-p-PLL.....	30
Figura 15: Circuito equivalente da malha de corrente	32
Figura 16: Inversor Trifásico Split-Capacitor.	34
Figura 17: Diagrama de Bode sem o Controlador	37
Figura 18: Diagrama de Bode com o Controlador	37
Figura 19: Diagrama de Bode sem o Controlador	38
Figura 20: Diagrama de Bode com o Controlador	39
Figura 21: Resposta ao degrau	39
Figura 22 - Fonte e estrutura de Potência	40
Figura 23 - Carga e Degrau de Carga.....	40
Figura 24 - Malha de corrente e comando das chaves	41
Figura 25 - Malha de tensão.....	41
Figura 26 - p-PLL da fase a	41

Figura 27: Tensão na rede (v_{Sabc}) e a corrente da carga 3 (i_{Labc}).....	42
Figura 28: Tensão na rede (v_{Sabc}) e a corrente na rede (i_{Sabc}).....	43
Figura 29: Espectro harmônico da corrente na carga 3 (i_{Labc}).....	44
Figura 30: Espectro harmônico da corrente na rede até 900Hz (i_{Sabc}).....	45
Figura 31: Espectro harmônico da corrente na rede de 19520Hz até 20480Hz (i_{Sabc})	46
Figura 32: Corrente na carga 3 (i_{Labc}) e a corrente na rede (i_{Sabc})	50
Figura 33: Tensão no barramento CC (V_{cc})	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características das Cargas e Tensões.....	16
Tabela 2 – Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 1	22
Tabela 3 – Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 2	22
Tabela 4 – Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 2	23
Tabela 5 – Características do Controlador PI de Corrente.....	36
Tabela 6 – Características do Controlador PI de Tensão.....	38
Tabela 7 – Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 3 (I_{Labc}) e a corrente da Rede (I_{Sabc})	47
Tabela 8 – Amplitudes das componentes Harmônicas da Rede, provenientes do Ruído de Chaveamento	47
Tabela 9 – DHT_i e fator de potência da carga e da rede	48
Tabela 10 – Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 1 (I_{Labc}) e a corrente da Rede (I_{Sabc}).....	48
Tabela 11 – Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 1 (I_{Labc}) e a corrente da Rede (I_{Sabc}).....	49
Tabela 12 – DHT_i e fator de potência das cargas 1 e 2 e da rede	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Objetivos.....	14
2	FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO.....	15
2.1	Harmônicos.....	15
2.2	Estrutura de Potência do Filtro Ativo de Potência Trifásico.....	23
2.3	Estratégias de Controle.....	24
2.3.1	Estratégia de Controle Convencional.....	25
2.3.2	Estratégia de Controle Simplificado.....	26
2.3.3	Circuito de Sincronismo p-PLL.....	29
3	PROJETO E MODELAGEM DOS CONTROLADORES.....	31
3.1.1	Modelo Matemático da Malha de Corrente.....	31
3.1.2	Modelo Matemático da Malha de Tensão.....	33
3.2	Projeto dos Controladores.....	35
4	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES.....	40
4.1	Resultados Estáticos.....	42
4.2	Resultados Dinâmicos.....	49
5	CONCLUSÕES.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

1 INTRODUÇÃO

A partir da criação dos primeiros transistores, em 1948, se tornou mais fácil a implementação dos primeiros conversores eletrônicos, uma vez que já existiam conversores a válvula. E com a evolução e desenvolvimento da eletrônica de potência é cada vez mais de se deparar com tais dispositivos, que funcionam a base de comutação de chaves eletrônicas, para recondicionar a tensão e a corrente, como fontes chaveada, retificadores, dentre outros (AKAGI, 1996). Tais dispositivos apresentam muitas vantagens, como elevados níveis de rendimento, tamanhos reduzidos e alguns podendo ser facilmente controlados. Esse aparato é visto pela fonte como uma carga não linear, portanto o mesmo irá consumir correntes não senoidais, elevando o conteúdo harmônico da rede, produzindo distorções nas tensões e nas correntes e assim diminuindo a qualidade da energia elétrica (QEE) (BRAGA, 2017).

Os harmônicos presentes na corrente podem ser propagados para a tensão, uma vez que na prática não existem fontes ideais, ou seja, sempre tem uma impedância em série com a rede elétrica. A corrente distorcida drenada do ponto de acoplamento comum (PAC) irá gerar uma queda de tensão com um perfil distorcido adicionando os harmônicos de tensão na rede. Isso pode gerar uma série de problemas como vibrações e ruídos em motores e transformadores, sobreaquecimento de enrolamentos, baixo rendimento, queima de banco de capacitores devido a ressonância harmônica e entre outros problemas (TEIXEIRA, 2003).

Ainda quando se tem equipamentos trifásicos a quatro-fios, conectados a uma rede com harmônicos, ocorre um fenômeno muito interessante, pois mesmo com as cargas perfeitamente equilibradas, surge uma corrente no neutro. Essa corrente é justamente proveniente das correntes harmônica de sequência zero, drenadas pela carga (GRUZS, 1990).

Evidentemente existem formas de diminuir o impacto dessas correntes e tensões harmônicas, que podem influenciar negativamente no funcionamento de qualquer aparelho ou equipamento conectado à uma rede. Uma técnica desenvolvida há bastante tempo, consiste em combinar indutores e resistores, conectados a um banco de capacitores, formando um circuito RLC (REIS et al, 2018). Tal circuito pode atuar como um filtro passivo sintonizável, e usando valores de indutores específicos,

o circuito irá entrar em ressonância para uma certa frequência. Quando esses valores de frequências, coincidem com a frequência de oscilação da componente harmônica, a mesma é drenada para o filtro. Combinando vários filtros em diferentes frequências de ressonância de determinadas harmônicas é possível diminuir os efeitos de cada uma individualmente. Um problema evidente em tal tecnologia é que a carga não pode variar, visto que seria necessário reajustar todos os componentes, para o filtro continuar mitigando as componentes harmônicas (TEIXEIRA, 2003; REIS et al, 2018). Existem mais alguns métodos para mitigar os efeitos das harmônicas como usar determinados tipos de conexões de transformadores trifásicos para ajudar a reduzir os efeitos de determinadas ordens de harmônicas. Já o filtro ativo verifica a tensão e a corrente da rede, compara com um sinal de referência e injeta ou drena uma corrente na rede, de forma que as componentes fiquem o mais próximo de uma onda senoidal pura, com a frequência nominal da rede. É importante ressaltar que o filtro também tem a capacidade de compensar os reativos da carga (ORTMANN; MUSSA, 2008).

O FAP deve fornecer a corrente exata, para que uma corrente distorcida da carga, se torne uma onda senoidal pura com a frequência nominal da rede, para isso é de extrema importância o cálculo dessa corrente. Para se ter tal resultado é necessário obter uma corrente de referência que contenha o mesmo perfil de onda que o desejado, portanto gerar essa corrente de referência é muito importante para um funcionamento eficiente e correto do filtro ativo. O método de compensação pela Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea p-q, é um dos mais pesquisados e mais explorados na literatura para realizar esse cálculo, e foi inicialmente desenvolvido por (AKAGI; KANAGAWA; NABAE, 1983,1984) e usado em sistemas trifásicos equilibrados. Outra tecnologia propagada nas literaturas é o método baseado no Sistema de Eixos de Referência Síncrona (SRF) apresentado em (CHENG; BHATTACHARYA; DIVAN, 2000), no artigo (ORTMANN; MUSSA, 2008; MODESTO, 2015) foi utilizado desse método em um FAP trifásico.

O FAP pode ser conectado tanto em série como visto em (RIBEIRO,2003) quanto em paralelo, nesse trabalho iremos utilizá-lo em paralelo. A função do mesmo é de diminuir ou extinguir as correntes múltiplas da frequência fundamental que são originalmente fornecidas pela rede, essas correntes no caso passam a serem fornecidas pelo FAP, além de fazer a compensação da potência reativa, se ajustando a variação da carga (POTTKER et al, 2004).

Para obter a corrente de compensação é medido apenas as tensões do barramento CC e a corrente da rede, entretanto o tempo de resposta dinâmica desse método é bem mais lenta do que se comparado aos métodos tradicionais citados anteriormente. Devido a esse fato, esse trabalho propõe a atuar nas estratégias de controle para melhor as respostas dinâmicas do mesmo durante variações de cargas.

1.1 Objetivos

Esse trabalho tem como principal objetivo elaborar um filtro ativo de potência paralelo trifásico utilizando do método de controle simplificado. Esse método irá propor uma alteração na malha de controle de tensão com o intuito de obter uma melhor resposta dinâmica da tal estratégia simplificada.

Objetivos específicos a serem abordados nesse trabalho são os seguintes:

- Propor melhorias;
- Simulações dos modelos propostos;
- Comparar os resultados do controle simplificado com a estratégia controle convencional.

2 FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA TRIFÁSICO

Nesta etapa do trabalho serão apresentados conceitos e definições sobre componentes harmônicas, problemas a serem resolvidos no método que será implementado no trabalho, possíveis soluções para melhora no tempo de resposta dinâmica do filtro e as cargas utilizadas.

2.1 Harmônicos

Harmônico é um componente de onda que tem uma frequência múltipla e inteira da frequência fundamental da rede. Cargas não-lineares tem a característica de gerar distorções harmônicas nos sistemas em que são conectadas.

De acordo com o teorema da série de Fourier, uma onda periódica que não seja necessariamente senoidal, pode ser definida como uma soma infinita de senoides e cossenoides múltiplas de uma frequência fundamental. Esse conceito pode ser aplicado em análises de correntes ou tensões distorcidas, visto que em regime permanente essas podem ser decompostas em várias componentes senoidais que tem uma frequência múltipla da fundamental como mostrado na equação (1):

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_n * \cos\left(\frac{n\pi x}{L}\right) + b_n * \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)] \quad (1)$$

Onde:

a_0 – Componente continua

a_n – Componente cossenoidal

b_n – Componente senoidal

n – Número natural que multiplica a frequência fundamental

L – Período da função

A seguir serão apresentados exemplos de cargas não lineares, que consomem correntes harmônicas da fonte, tais correntes são mostradas pelo espectro harmônico e os valores das cargas estão na tabela 1:

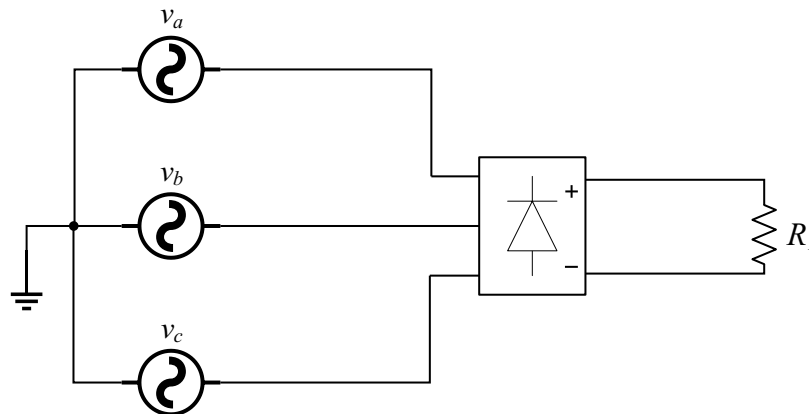
Tabela 1 – Características das Cargas e Tensões

	Fase 'a'	Fase 'b'	Fase 'c'
Carga 1	Retificador trifásico de onda completa com carga R ($R_1=17,7\Omega$)		
Carga 2	Retificador Monofásico com carga RL $R=8,1\Omega$ e $L=380\text{mH}$	Retificador Monofásico com carga RL $R=10,12\Omega$ e $L=346\text{mH}$	Retificador Monofásico com carga RL $R=13,5\Omega$ e $L=380\text{mH}$
Carga 3	Retificador Monofásico com carga RC $R=13,5\Omega$ e $C=940\mu\text{F}$	Retificador Monofásico com carga RL $R=10,12\Omega$ e $L=346\text{mH}$	Retificador Monofásico com carga RL $R=8,1\Omega$ e $L=380\text{mH}$
Tensão de fase Eficaz (V)	127	127	127

Fonte: Autoria própria.

Na figura de 1 é apresentado um retificador trifásico em ponte completa de seis pulsos conectado a uma carga a puramente resistiva, no caso a carga 1.

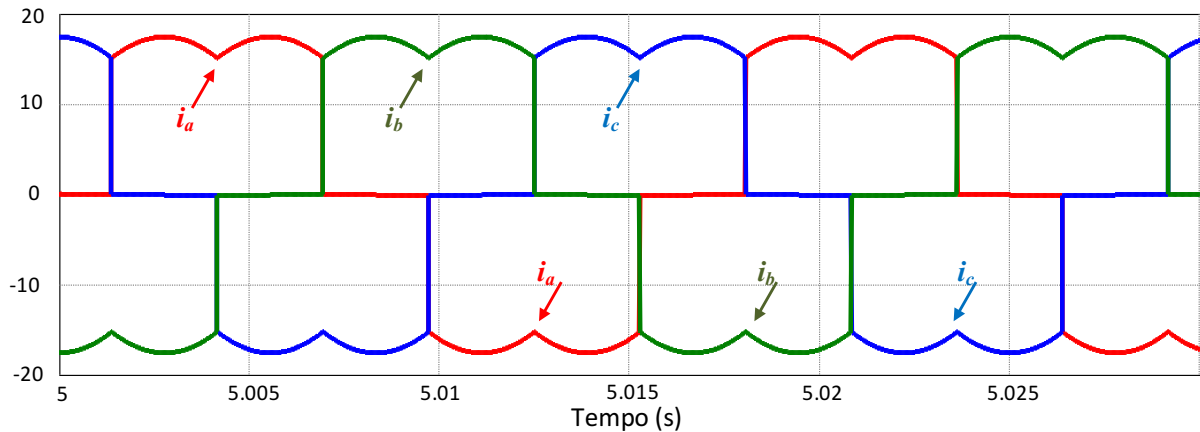
Figura 1: Carga 1 conectado à rede



Fonte: Autoria própria.

A figura 2 por sua vez apresenta alguns ciclos da corrente nas três fases da carga 1, de primeiro momento é possível observar que ela não é uma onda senoidal perfeita mesmo sendo uma carga puramente resistiva, devido ao uso de um retificador trifásico.

Figura 2: Correntes da carga 1 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente

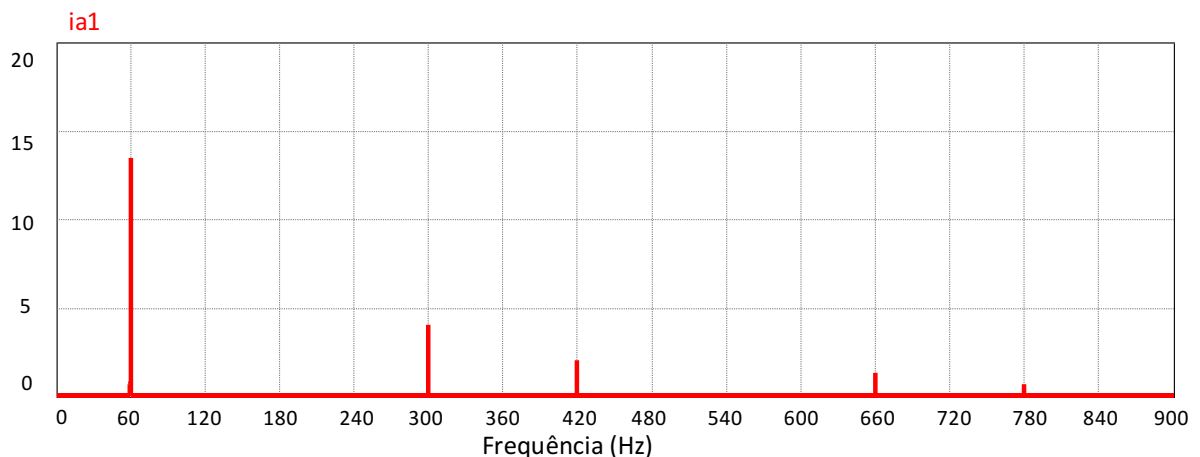


Fonte: Autoria própria.

A figura 3 por sua vez mostra o resultado do espectro harmônico, mostrando harmônicos de quinta, sétima, décima primeira e décima terceira ordem. Existem mais harmônicos que não aparecem na figura pelo fato de terem amplitudes muito pequenas em comparação com as que aparecem na mesma.

Como na carga 1 é utilizado um retificador trifásico, as correntes se diferenciam apenas pelo ângulo de fase, por isso é mostrado apenas o espectro harmônico da fase a , pois as fases b e c tem o mesmo resultado.

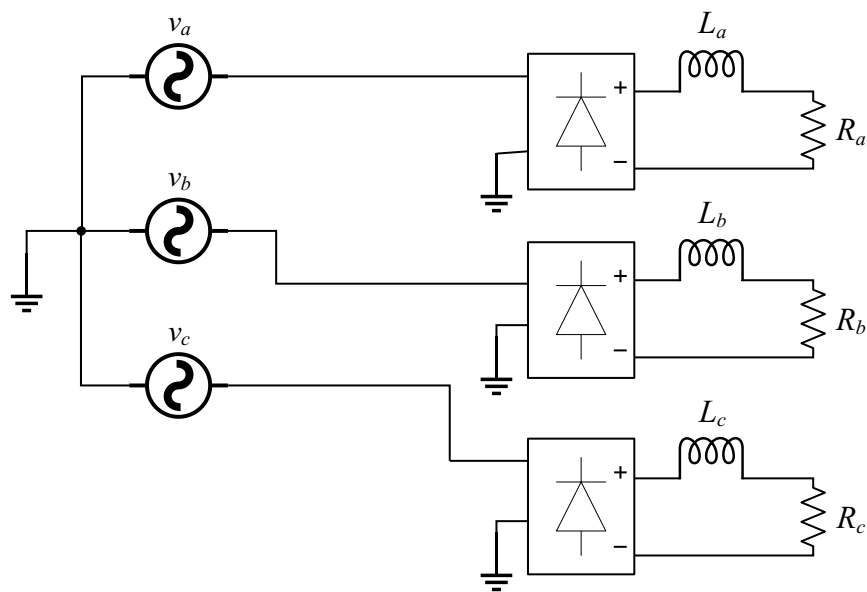
Figura 3: Espectro harmônico da corrente da carga 1 da fase a (i_a)



Fonte: Autoria própria.

Na figura 4 é mostrado a carga 2 conectado à rede, que consiste em 3 retificadores monofásicos em ponte completa com cargas RL de diferentes potências.

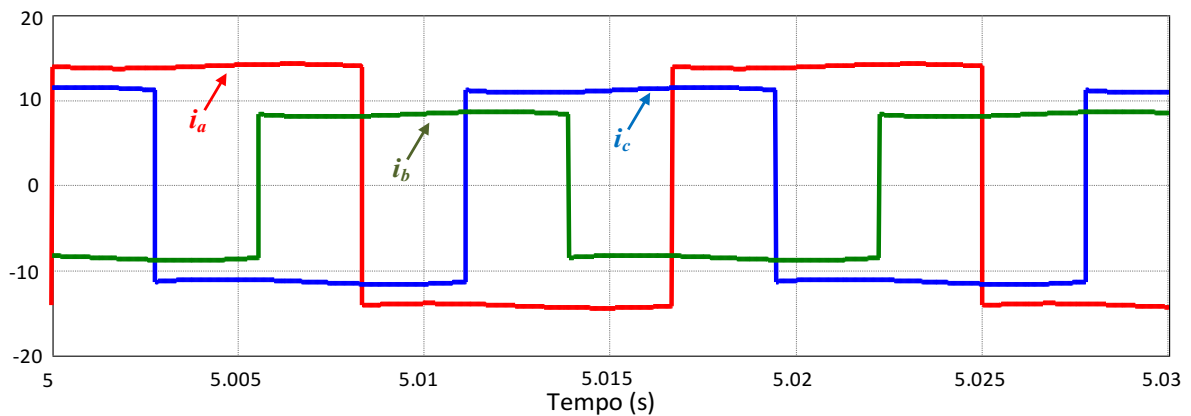
Figura 4: Carga 2 conectado à rede



Fonte: Autoria própria.

A figura 5 apresenta alguns ciclos da corrente de fase da carga 2, mostrando um perfil quadrado como já esperado, resultando em alto conteúdo harmônico que será mostrado na figura 6.

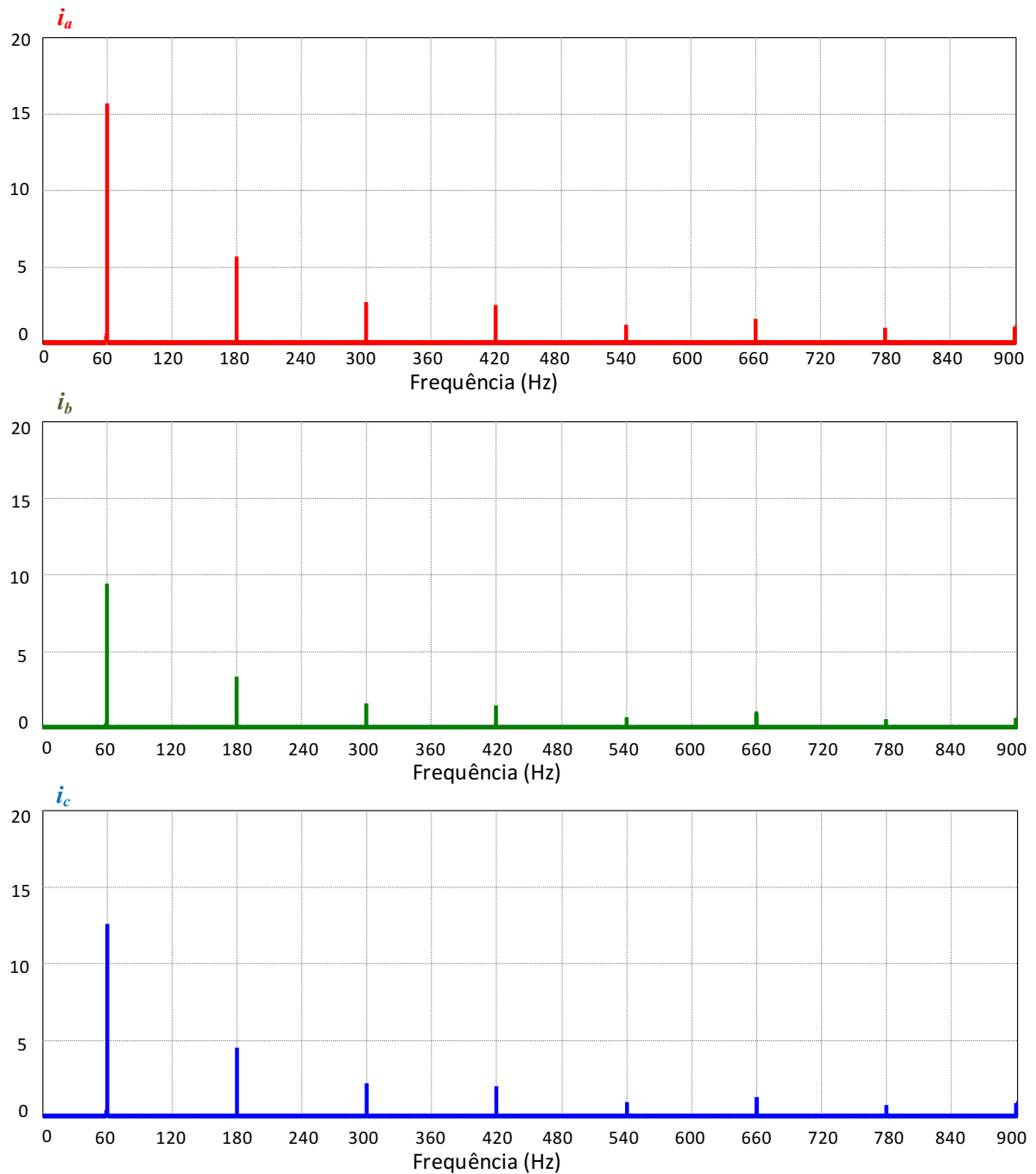
Figura 5: Correntes da carga 2 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente



Fonte: Autoria própria.

A figura 6 como já mencionado anteriormente, apresenta espectro harmônico das correntes de cada fase, elas possuem um perfil parecido pois se tratam da mesma carga, mas com os valores de resistência e indutância diferentes. É possível identificar a presença de harmônicos de ordem ímpar na análise.

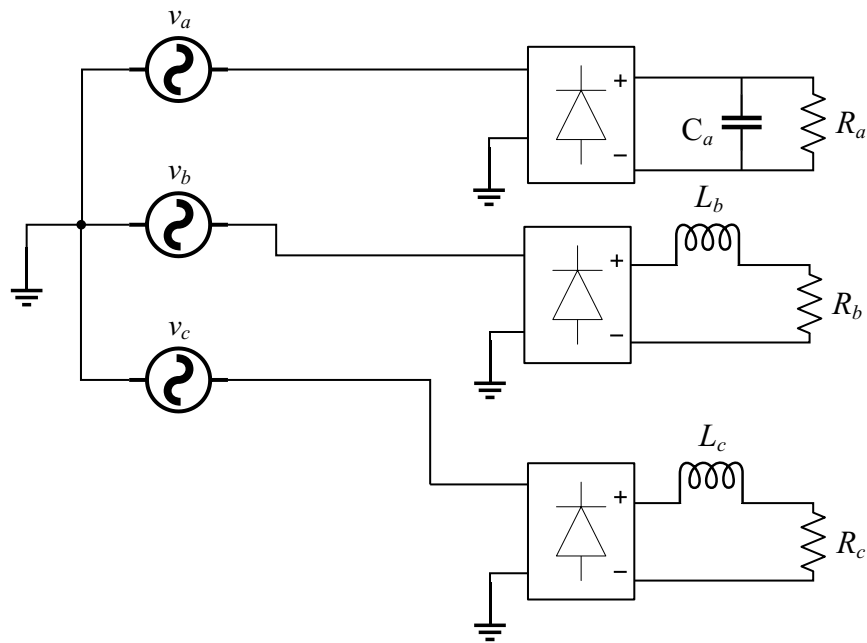
Figura 6: Espectro harmônico das corrente da carga 2 nas fase a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente



Fonte: Autoria própria.

A figura 7 apresenta o último exemplo de carga, onde é conectado um resistor em paralelo com um capacitor em um retificador monofásico em ponte completa na fase a , pois é um exemplo de carga muito crítico para as instalações e muito comum de ser encontrada, e nas demais fases também é utilizado um retificador monofásico, mas com uma carga RL.

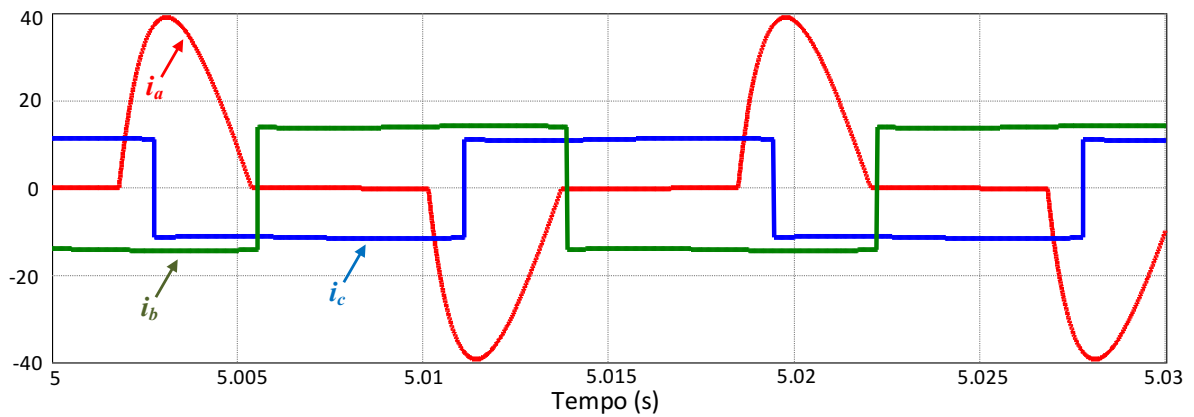
Figura 7: Carga 3 conectado à rede



Fonte: Autoria própria.

A figura 8 mostra alguns ciclos após o sistema entrar em regime permanente das correntes da carga 3.

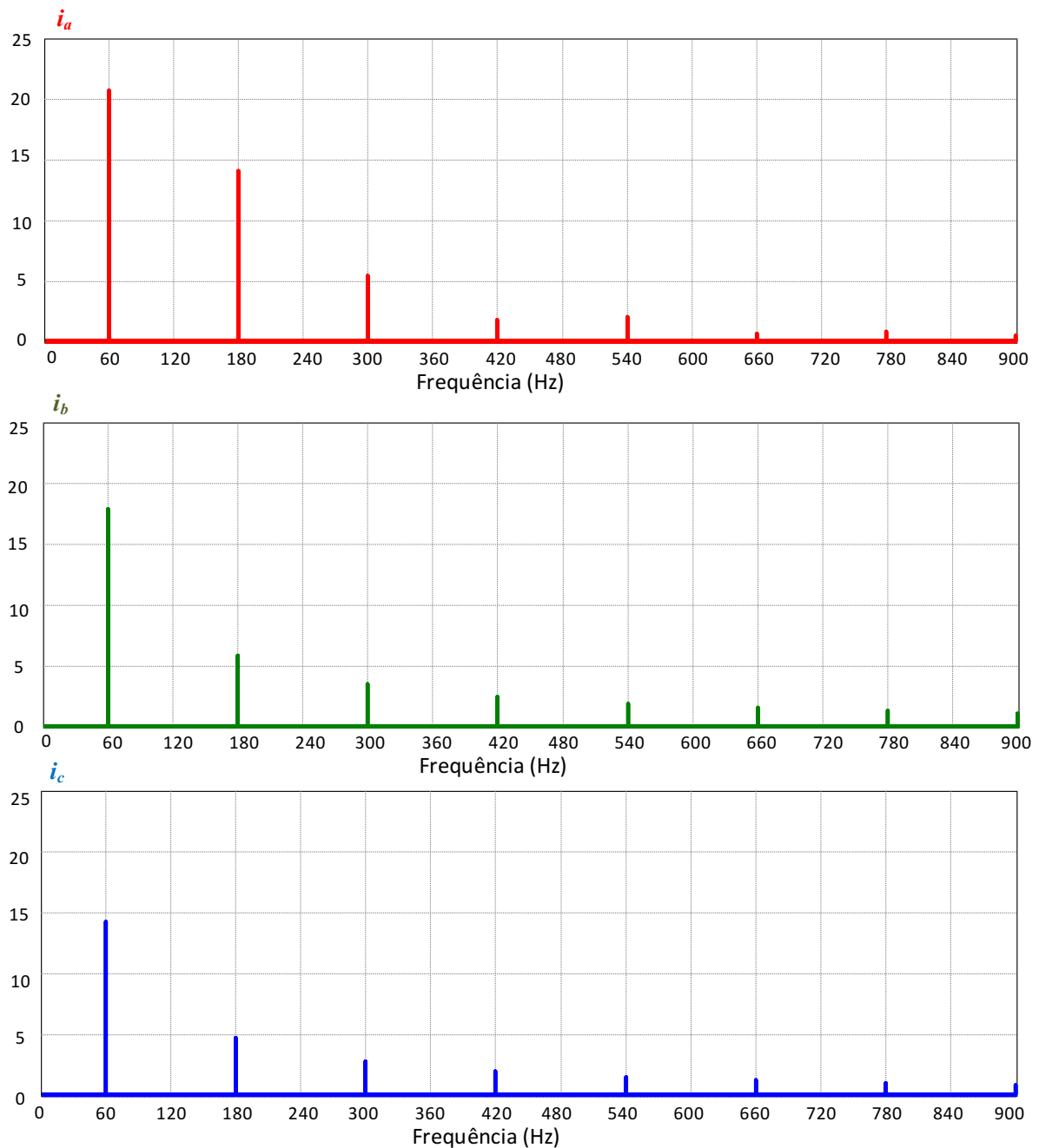
Figura 8: Correntes da carga 3 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente



Fonte: Autoria própria.

Na análise do espectro harmônico apresentado na figura 9 é possível verificar um alto conteúdo harmônico principalmente na fase a , com muitos harmônicos de ordem ímpar bem como nas demais fases.

Figura 9: Espectro harmônico das corrente da carga 3 das fases a, b, c (i_a, i_b e i_c) respectivamente



Fonte: Autoria própria.

Um dos modos usados para quantificar o efeito das componentes harmônicas na rede é chamada de distorção harmônica total (DHT), apresentado no módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (PRODIST, módulo 8, 2018). Esse indicador é usado para a tensão, entretanto o mesmo não calcula o todos os impactos, diferentemente da norma do *Institute of Electrical and*

Electronic Engineers (IEEE) (IEEE Std. 519, 1992). A taxa é calculada seguindo a expressão (2).

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

Onde:

DHT_V – Distorção harmônica total de tensão.

V_h – Valor rms da componente de tensão harmônica h .

V_1 – Valor rms da tensão fundamental.

A tabela 2, 3 e 4 mostram as taxas de distorções harmônicas de corrente em todas as cargas apresentadas, pois não existem distorções na tensão uma vez que é considerado um PAC ideal. As taxas de distorções harmônicas de corrente são calculadas da mesma forma que as de tensão.

Tabela 2 – Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 1

Amplitudes (A)	i_1	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}	i_{15}	$DHT_i(\%)$
Fase <i>a</i>	13,4	0	4,1	2,2	0	1,4	1,1	0	37,2
Fase <i>b</i>	13,4	0	4,1	2,2	0	1,4	1,1	0	37,2
Fase <i>c</i>	13,4	0	4,1	2,2	0	1,4	1,1	0	37,2

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3 - Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 2

Amplitudes (A)	i_1	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}	i_{15}	$DHT_i(\%)$
Fase <i>a</i>	15,6	5,8	2,8	2,7	1,4	1,7	1,1	1,3	48,2
Fase <i>b</i>	9,4	3,4	1,7	1,6	0,8	1,1	0,6	0,6	47,0
Fase <i>c</i>	12,6	4,5	2,2	2,1	1,1	1,4	0,8	0,9	46,4

Fonte: Autoria própria.

Tabela 4 - Amplitude individuais e taxas de distorção harmônicas das correntes da carga 3

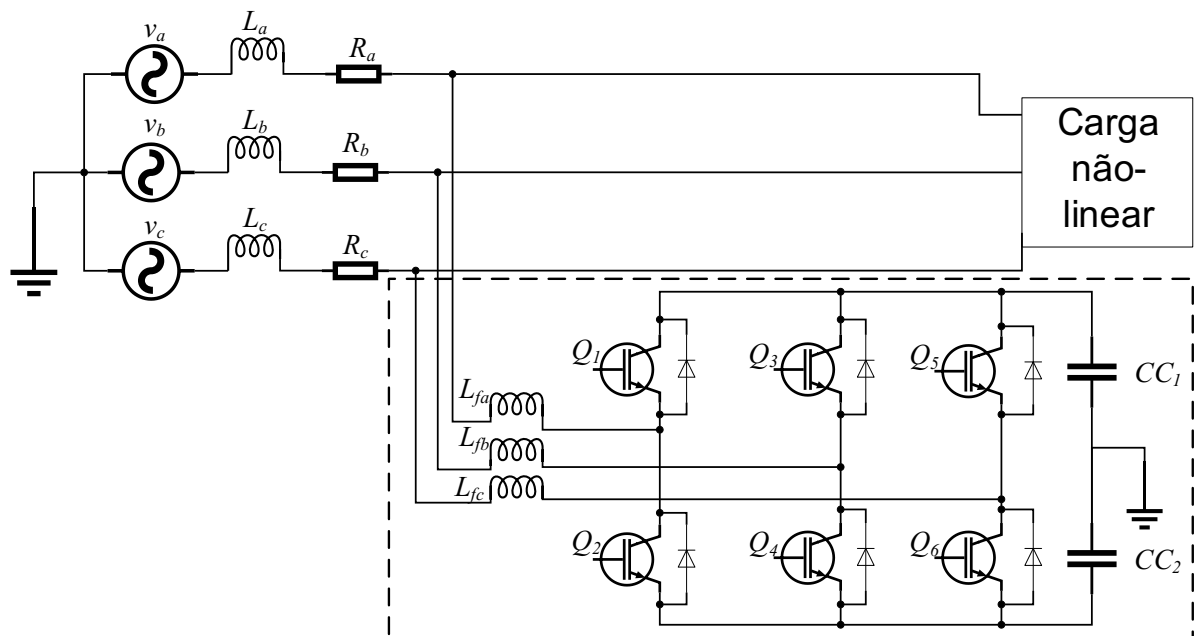
Amplitudes (A)	i_1	i_3	i_5	i_7	i_9	i_{11}	i_{13}	i_{15}	$DHT_i(\%)$
Fase a	21,5	14,2	5,8	2,0	2,3	0,8	1,2	0,8	73,1
Fase b	18,1	6,0	3,7	2,7	2,1	1,7	1,5	1,3	45,6
Fase c	14,4	5,0	3,1	2,3	1,7	1,5	1,2	1,2	48,1

Fonte: Autoria própria.

2.2 Estrutura de Potência do Filtro Ativo de Potência Trifásico

O filtro ativo de potência trifásico consiste em um conversor bidirecional em corrente trifásico que podem ser implementados por inversores de tensão conectados em paralelo com a rede e carga, que visa compensar as componentes harmônicas e/ou potências reativas que são gerados pela carga, como é exemplificado na figura 10 (MODESTO, 2007).

Figura 10: Inversor do FAP (em destaque) conectado no PAC.



Fonte: Autoria própria.

O FAP é constituído por um inversor trifásico que tem a função de gerar as correntes necessárias para a compensação, além de carregar os capacitores (CC_1) e (CC_2), que constituem o barramento CC, como o inversor atua gerando e recebendo

potência o mesmo é considerado um conversor bidirecional trifásico. As chaves do conversor por sua vez, podem ser moduladas por histerese ou por largura de pulsos (PWM) e essa modulação é determinada pela atuação da malha de controle de corrente. No FAP é realizado também o controle de tensão do barramento CC, visto que esse irá fornecer a energia para a geração da corrente de compensação (MODESTO, 2007). Uma vez que todos os elementos funcionem em harmonia, o filtro irá ter condições de fornecer as correntes harmônicas demandadas pela carga que com a fase oposta irá fazer com elas circulem entre o filtro e a carga apenas.

A topologia utilizada no inversor implementado no FAP é a trifásica com capacitor dividido. A maior vantagem dessa topologia obviamente é a menor quantidade de dispositivos semicondutores utilizados. Entretanto, desconsiderando as perdas nos conversores, a tensão no barramento CC deve ser pelo menos o dobro da tensão de pico da saída CA. Pelo fato da tensão no barramento CC ser mais alta, existe a necessidade de as chaves aguentarem uma tensão de bloqueio direto bem mais elevada. Isso aumenta o custo do conversor e aumenta também as perdas por comutação (MODESTO, 2015).

2.3 Estratégias de Controle

Em ambas estratégias de controle de FAPs é necessário um controlador de tensão, para que a tensão média do barramento CC se estabilize próximo ao valor de referência, para que o barramento possa sempre fornecer a corrente que irá compensar as harmônicas detectadas pelo outro controlador, além de compensar as perdas internas que o FAP apresenta. O capacitor será carregado por uma tensão que irá apresentar ondulações com frequência múltiplas da frequência fundamental da rede. A topologia split-capacitor trifásico, será abordada com mais detalhes no decorrer do trabalho.

Os problemas decorrentes de uma ação de controle do barramento CC mais lenta, são mais graves quando se é utilizado a estratégia de controle simplificado, uma vez que no método convencional o dispositivo que gera a corrente de referência é capaz de identificar mais rapidamente as variações na carga e manter o fluxo de potência equilibrado, diferentemente da técnica simplificada que irá demorar para responder a variação da carga e, portanto, equilibrar o fluxo de potência.

Um outro fator muito importante na implementação de um FAP, é a geração da corrente de referência. Existem inúmeros métodos para a obtenção da mesma como mostra a literatura em (KHADKIKAR; CHANDRA, 2008; MONTEIRO; CADAVAL; GONZÁLEZ, 2007; ABDESLAN et al., 2007).

Neste trabalho, será utilizado um circuito de sincronismos (PLL), que sincronizado com a componente de sequência positiva de rede elétrica, é capaz de gerar vetor unitário sincronizado com a rede e com boa imunidade a possíveis distorções existentes na tensão da rede elétrica, o mesmo será comentado e modelado com mais detalhes no decorrer deste trabalho.

2.3.1 Estratégia de Controle Convencional

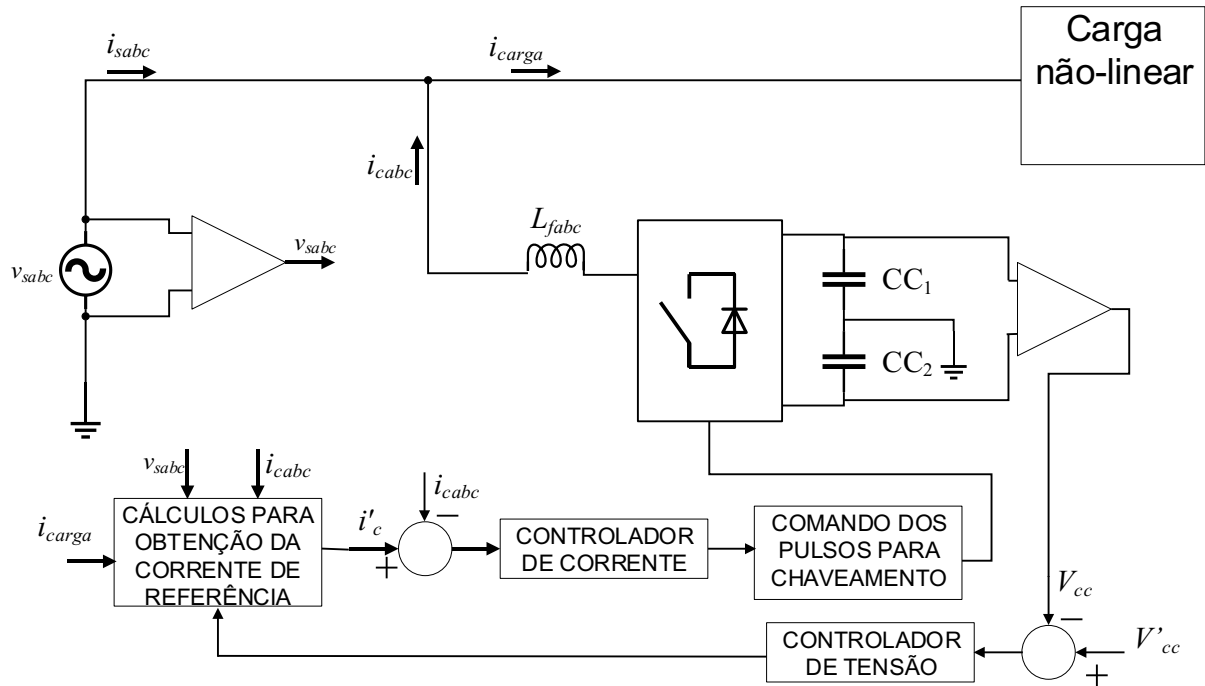
A estratégia de controle convencional é uma das técnicas para controle de FAP que é a mais estudada e apresentada nas literaturas. A corrente da carga e do filtro é monitorada constantemente. Uma vez obtido a corrente da carga é possível realizar os cálculos, utilizando-se de diversos métodos existentes para tal, e assim encontrar as componentes harmônicas e finalmente encontrar a corrente de referência do filtro.

Como citado anteriormente, a corrente de saída do filtro também é monitorada, para que exista a garantia de que a corrente de compensação gerada pelo FAP seja a que foi calculada por algum dos algoritmos empregado.

A literatura apresenta inúmeros estudos de métodos diversificados, como o baseado nos eixos de referência síncrona SRF que são muitas vezes utilizados em sistemas trifásicos e implementado em (GHETTI et al., 2012; MODESTO et al., 2016). Outro método bem conhecido e difundido é o Método de Potências Instantâneas p-q e o p-q estendido em (AKAGI; KANAGAWA; NABAE, 1983,1984;). Redes neurais também são utilizadas para a geração de correntes de referência como mostrado em (CAMPANHOL et al., 2011).

Na figura 11 é mostrado de forma genérica a técnica de controle convencional utilizada em um FAP.

Figura 11: Esquema de um FAP com controle convencional

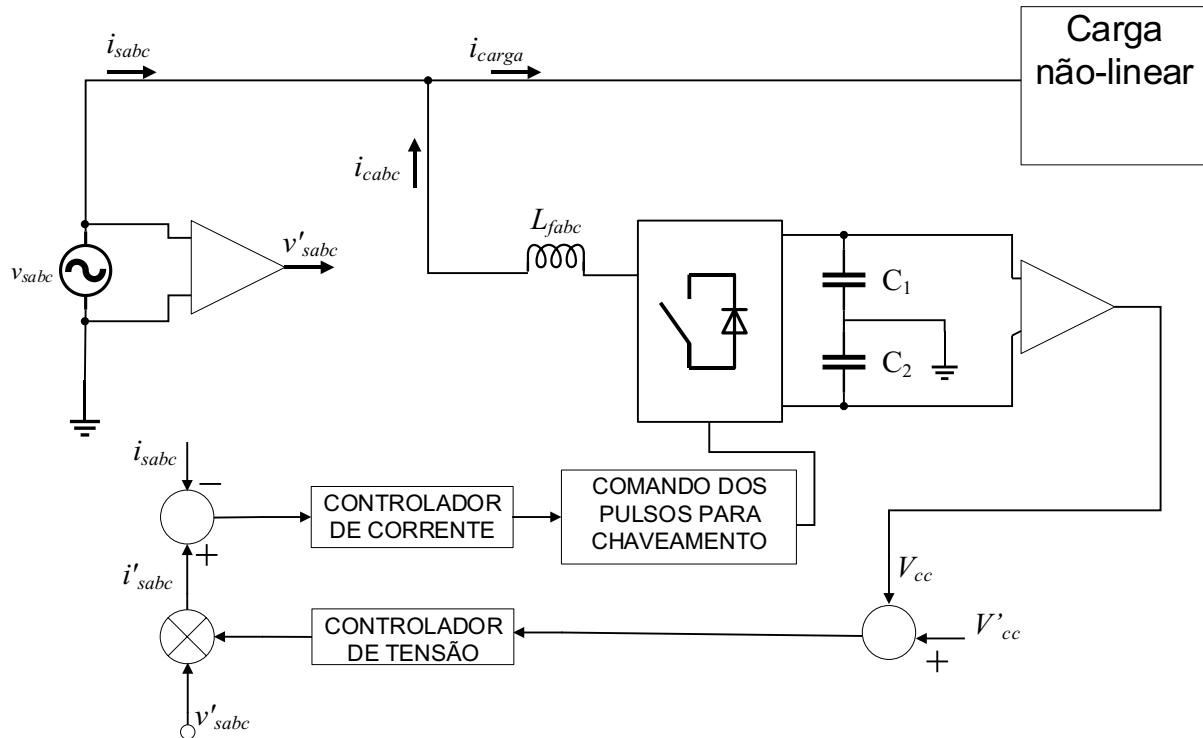


Fonte: Autoria própria.

2.3.2 Estratégia de Controle Simplificado

A estratégia de controle simplificado por sua vez, monitora apenas a corrente da rede, como é mostrado na figura 12. Tal método é dito simplificado pois não precisa realizar cálculos para encontrar as correntes harmônicas da carga, tornando inútil a utilização de sensores de corrente para o monitoramento da carga, bem como, os sensores de corrente do FAP (FENILI, 2007).

Figura 12: Esquema de um FAP com controle simplificado



Fonte: Autoria própria.

A principal diferença do método simplificado é que o mesmo faz o cálculo da corrente de referência utilizando a malha de tensão do barramento CC, fazendo com que a fonte forneça apenas a energia ativa da carga e as perdas existentes no FAP. Após o FAP passar pela etapa de pré carga dos capacitores o mesmo pode ser considerado em regime, assim quando a carga precisar de um aumento de energia ativa, os capacitores (C_1) e (C_2) irão fornecer essa energia, fazendo com que o mesmo descarregue. Com o monitoramento da tensão do barramento CC é possível comparar com uma tensão de referência (V_{cc}') e obter um erro que será enviado ao controlador de tensão, que irá adequar a tensão do capacitor para equilibrar o fluxo de potência. Logo, a amplitude da corrente de referência da rede (i'_{sabc}) será determinada pela resposta de tal ação de controle, uma vez que a mesma é o produto da saída do controlador e uma amostra da rede (v'_{sabc}) (POTTKER, 2004; POTTKER et al, 2004; FENILI,2007).

A corrente de compensação é obtida por meio do monitoramento da corrente da rede e comparando com uma corrente de referência, isso irá gerar um erro que será controlado pela malha de corrente, enviando os comandos para as chaves do inversor gerando uma corrente (i_{cabc}) que irá conter as componentes

harmônicas e a parcela reativa da carga, além de uma componente fundamental para manter a tensão do barramento CC.

Tal estratégia de controle, se comparada com a tradicional, apresenta uma menor quantidade de sensores como dito anteriormente e uma maior simplicidade dos cálculos, fazendo com que o esforço computacional e o custo de uma implementação, sejam reduzidos, tornando bastante atrativa. No entanto, apresenta uma resposta dinâmica durante variações de carga mais lenta, e ainda a corrente da rede fica imune aos distúrbios presentes na tensão da rede elétrica.

Como a ação do controlador do barramento CC precisa ser lenta, para não sofrer a influência das ondulações presentes no próprio barramento CC, uma vez que essas ondulações poderiam ser adicionadas no cálculo e propagadas pra rede. Isso faz com que essa técnica tenha uma resposta a variações da carga, mais lenta, assim como uma etapa de transitório maior, se comparado com o método tradicional.

Existem exemplos de estratégias de controle simplificado como as apresentadas em (SOUZA; BARBI, 1999; MODESTO et al., 2013) que utilizaram de um controlador Proporcional Integral (PI), e em ambas implementações foram aplicadas em sistemas monofásicos que utilizavam topologias de conversores que apresentava uma ondulação de 120 Hz e seus múltiplos na tensão do barramento CC, por isso o controlador do mesmo deve apresentar uma banda passante de no máximo 12Hz para que as ondulações não sejam propagadas para a rede. No caso da topologia utilizada nesse trabalho, implementada em (MODESTO et al., 2016) as variações apresentadas no barramento CC são da ordem de 120Hz e seus múltiplos, por isso a banda passante do controlador PI deve ser de no máximo 12Hz.

Tendo em mente esses problemas esse trabalho irá utilizar um filtro de média móvel (FMM) na malha de controle de tensão para filtrar as ondulações contidas no barramento CC e assim pode incrementar a velocidade da atuação do controle sem que as ondulações se propagam para a rede.

Além disso, se for utilizada a amostra da tensão da rede para gerar a referência de corrente tornará o sistema dependente da forma de onda da tensão portanto, é usado neste trabalho um sistema de detecção de frequência e ângulo de fase da rede, adquirido por um sistema de sincronismo (PLL). Esse sistema visa gerar uma frequência e a fase necessária para a corrente de referência, fazendo com que esta tenha uma maior imunidade a possíveis oscilações da tensão da rede.

Na estratégia de controle simplificada o equilíbrio do fluxo de potência é dado por meio da ação de controle da amplitude da corrente da rede, diferentemente do controle convencional.

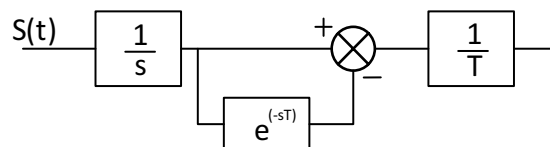
Na malha de tensão é adicionado um filtro média móvel (FMM) que tem a função de barrar as oscilações que provenientes da variação da tensão no barramento CC. Tal filtro tem uma resposta rápida pois só depende dos pontos que se planeja obter o valor médio. Uma das vantagens da utilização desse filtro é a fácil implementação e de fácil compreensão (MODESTO, 2007). Ele calcula, para sistemas discretos, utilizando a equação (3)

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} x[i + j] \quad (3)$$

O filtro de média móvel pode ser considerado um FPB onde a frequência de corte é o período de integração de que se pretende calcular o valor médio, por esse motivo ele realiza a filtragem de frequência que são múltiplas do período de integração (MODESTO, 2007). O diagrama de blocos desse filtro é dado pela figura 13 e a função de transferência do mesmo é dado pela equação (4)

$$M[s] = \frac{1 - e^{-sT}}{sT} \quad (4)$$

Figura 13: Diagrama de blocos Filtro Média Móvel



Fonte: Autoria própria.

2.3.3 Circuito de Sincronismo p-PLL

Neste trabalho para a geração das coordenadas do vetor unitário síncrono ($\sin\theta$ e $\cos\theta$) será utilizado um sistema STF-p-PLL, mostrado na figura (14) e proposto em (MODESTO, 2015; SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008). O algoritmo PLL

tem a função de oferecer, quando utilizado em redes trifásicas, um vetor unitário sincronizado com a componente de sequência positiva da tensão da rede, sendo o mesmo livre de distorções, tornando o filtro mais robusto a oscilações de tensão, além de fornecer a fase e a frequência necessária para a geração da corrente de referência, assegurando que a mesma esteja sincronizada com a tensão da rede.

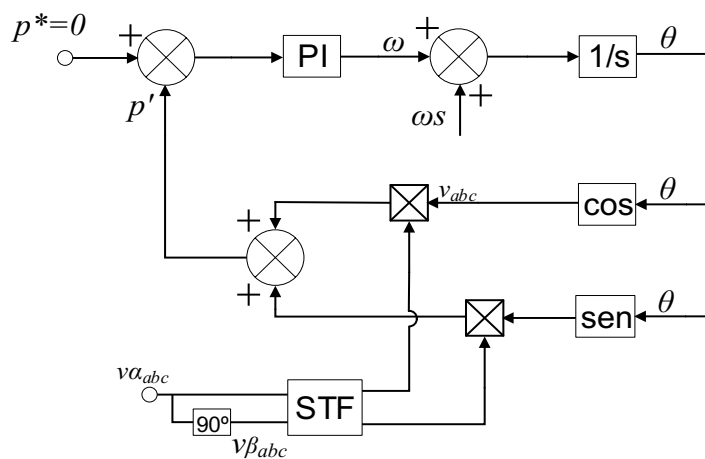
O modelo do PLL traz algumas melhorias, como o filtro auto-sintonizante (STF) que é importante pois, o sistema p-PLL se baseia na teoria de potência ativa instantânea, o que torna o mesmo passível das harmônicas presentes na tensão da rede como implementado e explicado com maiores detalhes em (BACON, et al 2012; SILVA, et al 2008).

Uma particularidade da implementação é que foi utilizado um único PLL, mas tendo como entrada as tensões trifásicas. Uma vez que o sistema PLL precisa captar o ângulo de fase e a frequência da rede elétrica.

Como o sistema é trifásico, são geradas defasagens do ângulo θ , para que assim possa ser geradas mais duas saídas senoidais correspondentes as fases b e c .

O mesmo está ilustrado na figura 14.

Figura 14: Diagrama em blocos do sistema STF-p-PLL



Fonte: Autoria própria.

3 PROJETO E MODELAGEM DOS CONTROLADORES

O filtro ativo estudado nesse trabalho irá precisar de quatro ações de controle para o seu correto funcionamento. Uma para a malha de tensão, outros 3 para a malha de corrente, sendo uma para cada fase.

A malha de corrente por sua vez é quem de fato faz a compensação das componentes harmônicas, por isso ela deve ter uma resposta rápida para ter a capacidade de gerar a corrente necessária mesmo com variações na carga (POTTKER, 2004). A modelagem usada será o por valores médios instantâneos, que é o mais comumente encontrado nas literaturas.

Na malha de tensão busca-se manter o valor médio de tensão nos capacitores do barramento CC maior que o pico da rede e com a menor oscilação possível (MODESTO, 2007; POTTKER et al, 2004; FENILI, 2007), para que o FAP sempre injete corrente no sistema. A modelagem dessa malha e projeto do controlador será feito no decorrer deste trabalho.

3.1.1 Modelo Matemático da Malha de Corrente

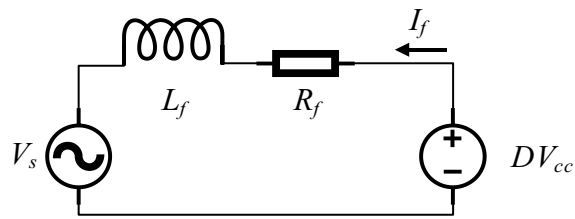
A malha de corrente por sua vez tem a função de controlar a corrente de compensação que será sintetizada pelo inversor.

Será utilizado o método de modelagem por valores médios instantâneos, e para facilitação dos cálculos é assumido neste momento da modelagem que não há ondulações na tensão do barramento CC.

Para o projeto do controlador da malha de corrente, é necessário inicialmente encontrar a função de transferência, no plano s , que descreva a planta a ser controlada. Essa função de transferência deve relacionar a corrente do filtro (I_f) e a razão cíclica do inversor (D).

Devido a topologia do conversor bidirecional Split-Capacitor, cada par de chaves só conduz por 120° e nos outros 240° as mesmas ficam bloqueadas, fechando o circuito no ponto central do barramento CC e, portanto, não existe acoplamento entre as fases do inversor. Podemos então aproximar o sistema, a um circuito elétrico monofásico da figura 15. Onde são levados em consideração o indutor de acoplamento L_f e a resistência interna desse indutor R_f .

Figura 15: Circuito equivalente da malha de corrente



Fonte: Autoria própria.

Aplicando então a lei das Tensões de Kirchoff no circuito da figura 15 tem-se então a equação (4) e realizando algumas manipulações matemáticas encontra-se a equação (5)

$$V_s + L_f \frac{dI_f(t)}{dt} + I_f(t)R_f = D(t) * V_{cc} \quad (4)$$

$$\frac{dI_f(t)}{dt} = \frac{D(t) * V_{cc} - V_s - I_f(t)R_f}{L_f} \quad (5)$$

É então aplicado um pequeno distúrbio na equação (5) originando a equação (6)

$$\frac{d[I_f(t) + \delta I_f(t)]}{dt} = \frac{[D(t) + \delta D(t)] * V_{cc} - V_s - [I_f(t) + \delta I_f(t)]R_f}{L_f} \quad (6)$$

Substituindo a equação (5) em (6) e realizando as manipulações matemáticas, encontra-se a equação (7)

$$\frac{d\delta I_f(t)}{dt} = \frac{\delta D(t) * V_{cc} - \delta I_f(t)R_f}{L_f} \quad (7)$$

Utilizando então a transformada de Laplace, para a análise no domínio da frequência obtemos a equação (8)

$$s\delta I_f(s) = \frac{\delta D(s) * V_{cc} - \delta I_f(s)R_f}{L_f} \quad (8)$$

Isolando as variáveis da função de transferência que se deseja encontrar, no caso a corrente do filtro (I_f) e a razão cíclica do inversor (D), é encontrado a equação (9) que é a função de transferência da malha de corrente $G_i(s)$

$$G_i(s) = \frac{\delta I_f(s)}{\delta D(s)} = \frac{V_{cc}}{R_f + sL_f} \quad (9)$$

Em virtude de estar sendo utilizado um modulador PWM, deve ser adicionado um ganho em série com a planta da corrente, representada pela equação (9). Esse ganho é o inverso da amplitude da onda triangular usada na implementação, que no caso é 2, obtendo a equação (10).

$$G_i(s) = \frac{\delta I_f(s)}{\delta D(s)} * \frac{1}{2} = \frac{V_{cc}}{(R_f + sL_f)} * \frac{1}{2} = \frac{V_{cc}}{2 * (R_f + sL_f)} \quad (10)$$

Essa função de transferência $G_i(s)$ é a que representa uma fase do FAP, que será idêntica as demais fases.

3.1.2 Modelo Matemático da Malha de Tensão

A malha de tensão tem função de manter a tensão nos capacitores do barramento CC constante, ou praticamente constante visto que haverá uma oscilação proveniente da circulação da corrente entre o inversor e o próprio barramento CC, e também de manter a magnitude da tensão acima do pico da tensão da rede, garantindo que a corrente sempre irá fluir do FAP para a rede e não ao contrário, uma vez que a intenção do filtro é justamente fornecer corrente e não a consumir, isso considerando em regime permanente e que se o FAP fosse ideal.

O modelo matemático parte do princípio de que a potência ativa média do barramento CC (P_{cc}) é igual a potência ativa média que flui entre a rede e o filtro ativo (P_s) (CAMPANHOL et al, 2013), como mostrado na equação (11). Este modelo também desconsidera as perdas que existem no chaveamento do inversor e no indutor L_f .

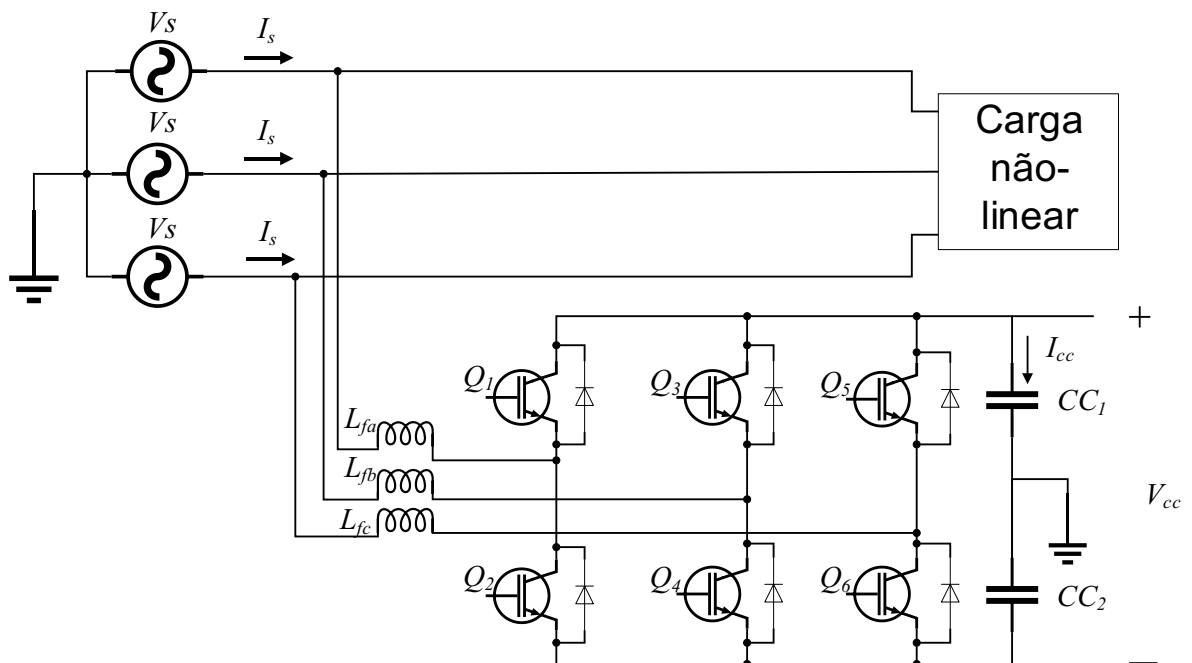
$$P_{cc} = P_s = V_{cc} * I_{cc} = V_s * I_s * \sqrt{3} \quad (11)$$

Onde V_{cc} e I_{cc} são a tensão e corrente do barramento CC, V_s e I_s são a tensão e corrente da rede, conforme ilustrado na figura 16. Substituindo a corrente I_{cc} , na equação (11), pela equação que descreve a corrente em um capacitor (12) e realizando manipulações matemáticas, foi possível encontrar a equação (13).

$$V_{cc} * C_f * \frac{dV_{cc}}{dt} = V_s * I_s * \sqrt{3} \quad (12)$$

$$\frac{dV_{cc}}{dt} = \frac{V_s * I_s * \sqrt{3}}{V_{cc} * C_f} \quad (13)$$

Figura 16: Inversor Trifásico Split-Capacitor.



Fonte: Autoria própria.

Partindo da equação (13) e utilizando o modelo de pequenos sinais é possível encontrar o comportamento da tensão do barramento CC representado por uma equação. O que torna possível a utilização desse método, é que a variação de tensão nos capacitores do barramento CC é muito pequena, então a partir de tal equação tem-se o seguinte (14).

$$\frac{d[V_{cc} + \delta V_{cc}]}{dt} = \frac{V_s * [I_s + \delta I_s] * \sqrt{3}}{V_{cc} * C_f} \quad (14)$$

Logo a parcela das variáveis com os distúrbios aplicados da equação (14) é representada pela equação (15).

$$\frac{d\delta V_{cc}}{dt} = \frac{V_s * \delta I_s * \sqrt{3}}{V_{cc} * C_f} \quad (15)$$

Passando a equação (15) para o domínio da frequência, utilizando-se da transformada de Laplace, é obtido a equação (16) mostrada abaixo

$$s\delta V_{cc}(s) = \frac{V_s * \delta I_s(s) * \sqrt{3}}{V_{cc} * C_f} \quad (16)$$

A função de transferência da malha de tensão deve expressar a tensão do barramento V_{cc} pela corrente da rede I_s . Logo a FT malha de tensão a ser controlada é dada pela equação (17).

$$G_v(s) = \frac{\delta V_{cc}(s)}{\delta I_s(s)} = \frac{V_s * \sqrt{3}}{V_{cc} * C_f s} \quad (17)$$

3.2 Projeto dos Controladores

O conversor bidirecional usado será controlado por meio de controladores PI como já mencionado anteriormente. E o projeto dos mesmos, seja o de corrente ou de tensão, serão feitos da mesma forma.

O que estabelece o comportamento do controlado PI, são os ganhos proporcional e integral (K_p e K_i). Tais ganhos são calculados baseando-se na resposta em frequência, via diagrama de Bode, e tendo como critérios de projeto a margem de fase e frequência de cruzamento do ganho do sistema compensado, como é apresentado em (MODESTO, 2015).

Os critérios de projeto, obviamente irão influenciar no comportamento do sistema. A estabilidade e o amortecimento estão envolvidos com a margem de fase ϕ_d , e quanto maior ϕ_d mais amortecido será o sistema. Em projetos de sistemas chaveados é adequado uma margem de fase entre 45° e 90°. O tempo de resposta por sua vez está relacionado com a frequência de cruzamento ω_C . quanto maior ω_C menor será o tempo de resposta. Entretanto deve se ater também a frequência de chaveamento do conversor, para que não haja interferência nas malhas de controle. Então é recomendado que o ω_C seja definido entre um quarto e um décimo da frequência de chaveamento (MODESTO, 2015; BARBI, 2001).

Para o cálculo dos ganhos K_p e K_i utiliza-se as equações (18) e (19), baseado no diagrama de Bode, respectivamente.

$$K_p = M_c * \cos \phi_c \quad (18)$$

$$K_i = -K_p * \omega_c * \tan \phi_c \quad (19)$$

Onde M_c é o módulo dos controladores PI para o ω_c escolhido e ϕ_c é o ângulo de fase que os controladores devem possuir. Este é calculado pela equação (20), onde o ângulo ϕ_c é a diferença entre a margem de fase desejada ϕ_d e a margem de fase da planta ϕ_p acrescida de 180° , garantindo assim que o sistema compensado tenha o ângulo desejado na frequência de cruzamento ω_c .

$$\phi_c = \phi_d - (\phi_p + 180) \quad (20)$$

Com o modelo da planta já encontrado anteriormente e com a ajuda de um programa no MATLAB, foi possível encontrar os valores de K_p e K_i para diversas margens de fase (ϕ_d) e frequência de cruzamento (ω_c), seguindo as especificações da malha a ser controlada e levando em consideração os efeitos de cada critério de projeto.

A malha de corrente precisa ter uma resposta rápida a possíveis variações de carga, entretanto ela não pode sofrer efeitos da frequência de chaveamento do inversor que gera as correntes de compensação. O mesmo tem uma frequência de chaveamento de 20KHz, por isso a frequência de cruzamento (ω_c) é ajustada a um quinto dessa frequência, como mostrado na tabela (5) que vem a seguir juntamente com o valor da margem de fase (ϕ_d) e os valores de K_p e K_i .

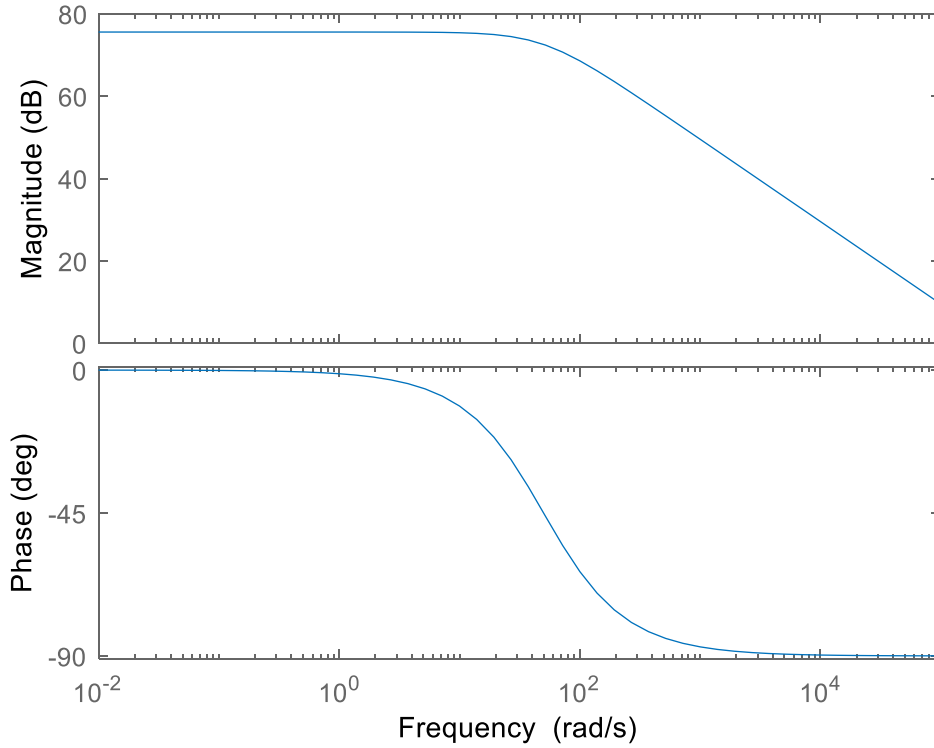
Tabela 5 – Características do Controlador PI de Corrente

Controlado PI da Malha de Corrente			
ϕ_d (°)	ω_c (rad/s)	K_p	K_i
60	25132,74	0,07247	1056,385

Fonte: Autoria própria.

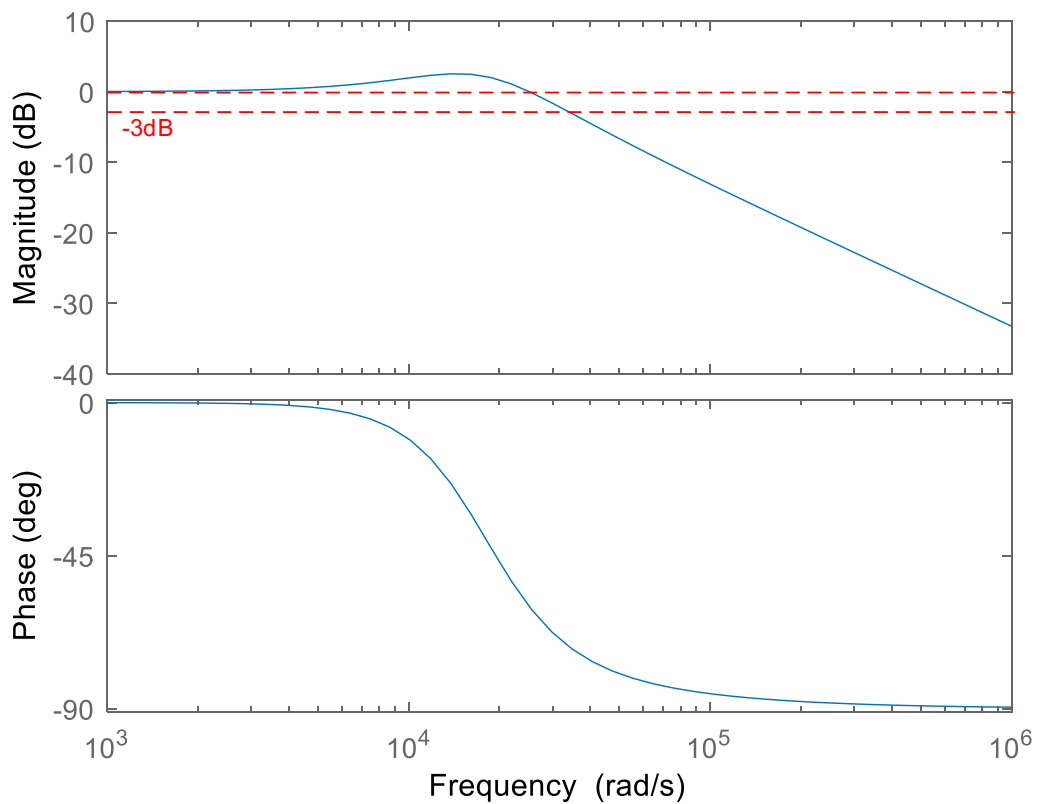
Os diagramas de bode da planta com e sem o controlador (17,18) estão mostrados a seguir

Figura 17: Diagrama de Bode sem o Controlador



Fonte: Autoria própria.

Figura 18: Diagrama de Bode com o Controlador



Fonte: Autoria própria.

A malha de tensão também precisa ter uma ação rápida, pois as variações na carga acabam diminuindo a tensão no barramento CC, e o controlador deve atuar

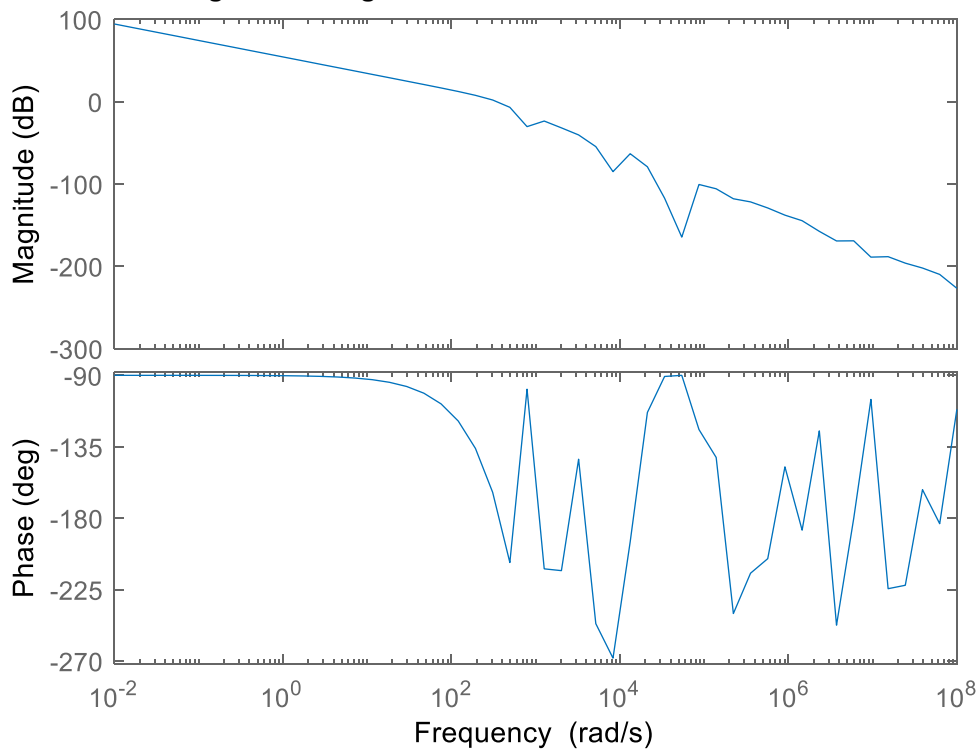
rapidamente para manter a tensão acima do valor mínimo, esse valor mínimo como já mencionado anteriormente corresponde a pelo menos a tensão de pico da fonte. Entretanto o mesmo precisa ter uma ação mais lenta para não sentir os efeitos do conversor bidirecional atuando como um retificador, que gera uma tensão com uma frequência de 120Hz. Logo a frequência de cruzamento deve ser ajustada a um quinto dessa frequência. As características desse controlado está apresentado na tabela (6) abaixo, juntamente com os diagramas de Bode (19,20) e a resposta a um degrau (21).

Tabela 6 – Características do Controlador PI de Tensão

Controlado PI da Malha de Tensão			
$\phi_d (^{\circ})$	$\omega_c (rad/s)$	K_p	K_i
47.7	150.7964	0.31007	5.1621

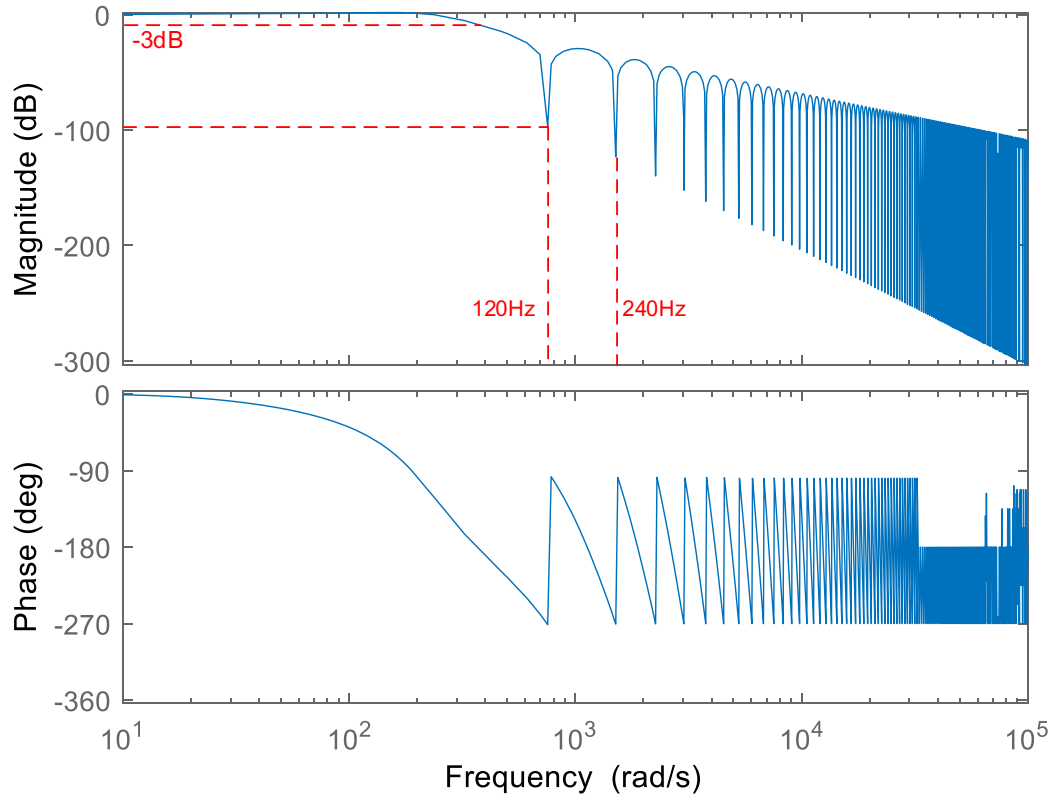
Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Diagrama de Bode sem o Controlador



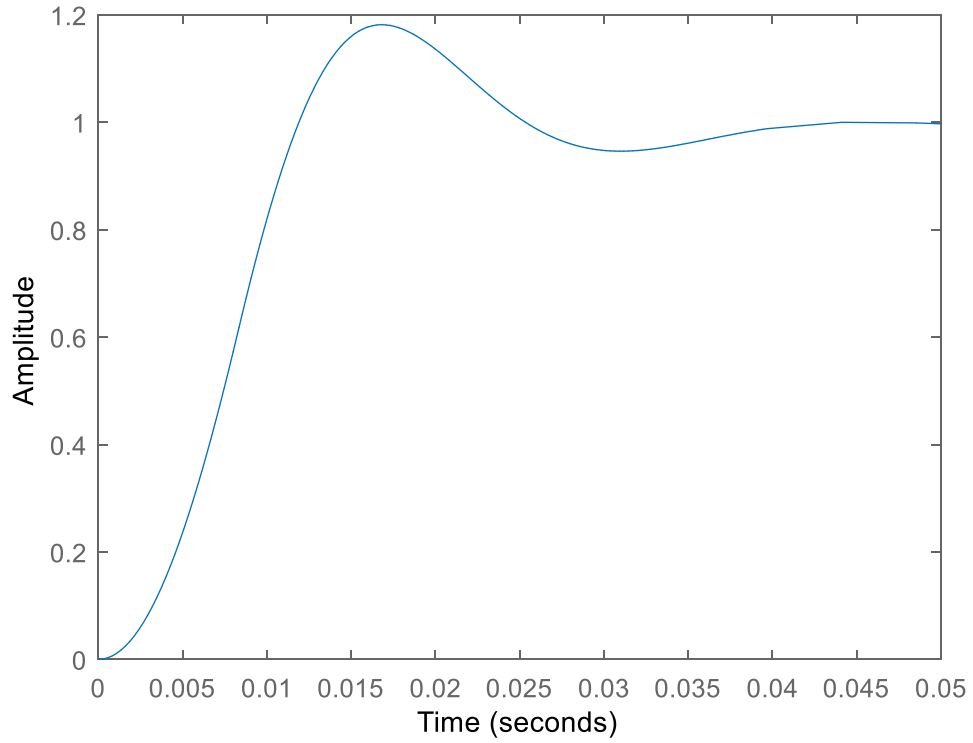
Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Diagrama de Bode com o Controlador



Fonte: Autoria própria.

Figura 21: Resposta ao degrau



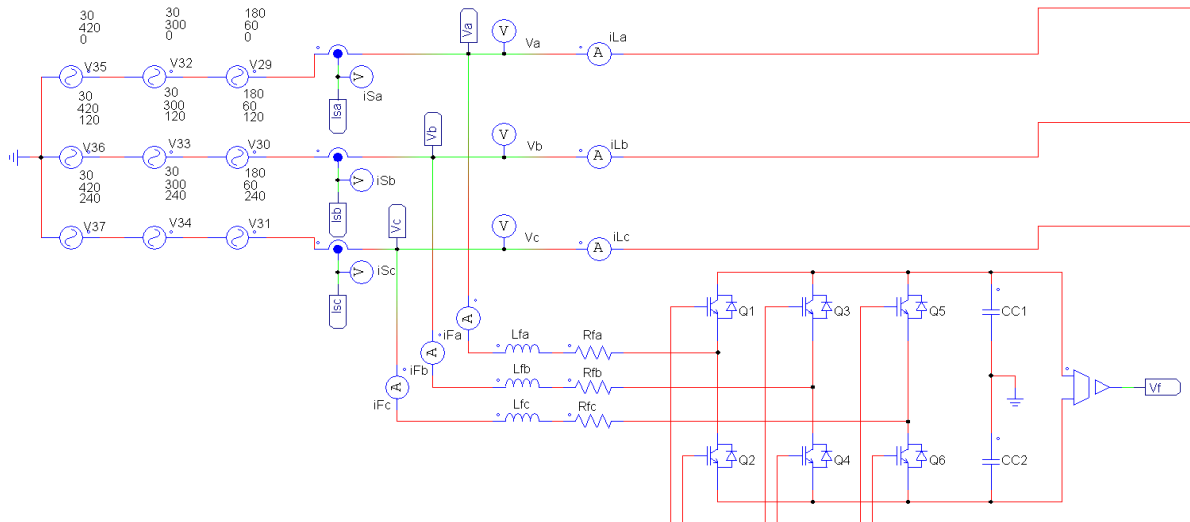
Fonte: Autoria própria.

4 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Nessa seção é apresentado os resultados obtidos das simulações realizadas no software PSIM. A primeira parte irá mostrar o funcionamento estático do circuito e a segunda parte os resultados dinâmicos, ou seja, quando existe a variação da carga. É importante ressaltar que na tensão da rede existem harmônicos de quinta e sétima ordem, para mostrar a robustez do controle a possíveis distorções na rede.

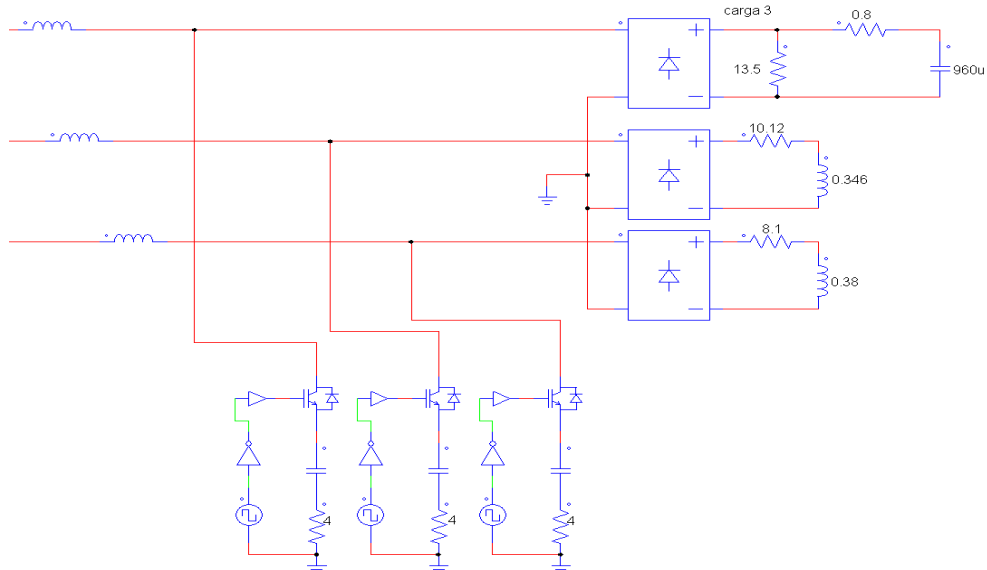
Nas figuras 22, 23, 24, 25 e 26 é mostrado o circuito implementado no software, de forma dividida.

Figura 22 - Fonte e estrutura de Potência



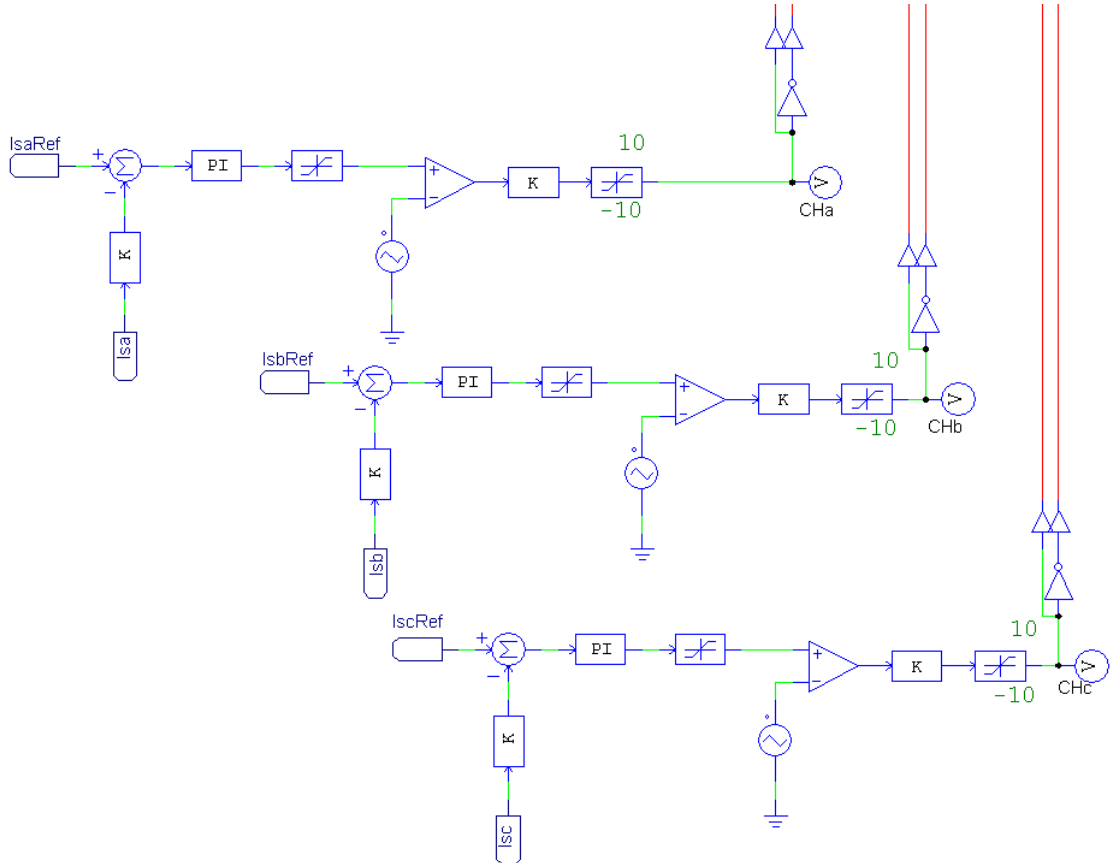
Fonte: Autoria própria.

Figura 23 - Carga e Degrau de Carga



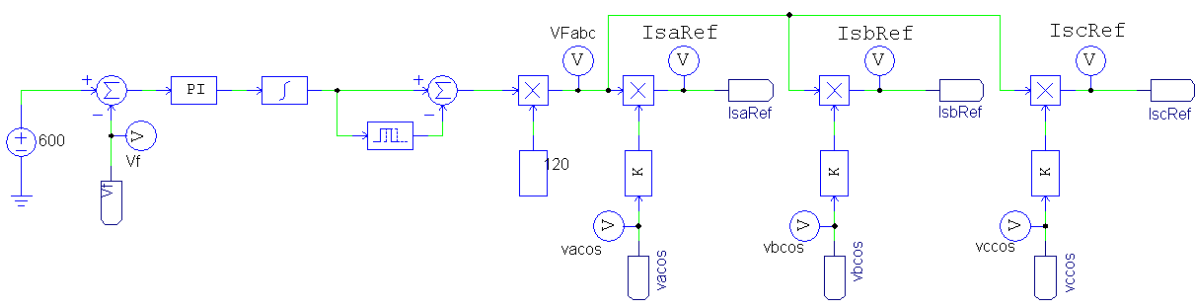
Fonte: Autoria própria.

Figura 24 - Malha de corrente e comando das chaves



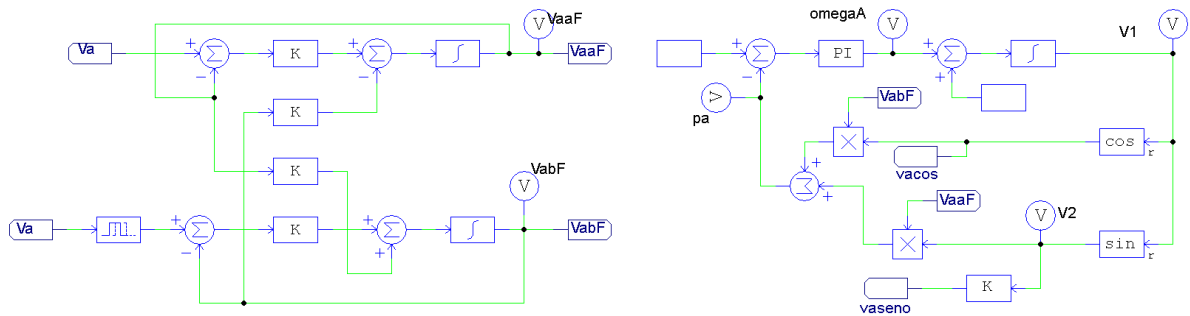
Fonte: Autoria própria.

Figura 25 - Malha de tensão



Fonte: Autoria própria.

Figura 26 - p-PLL da fase a

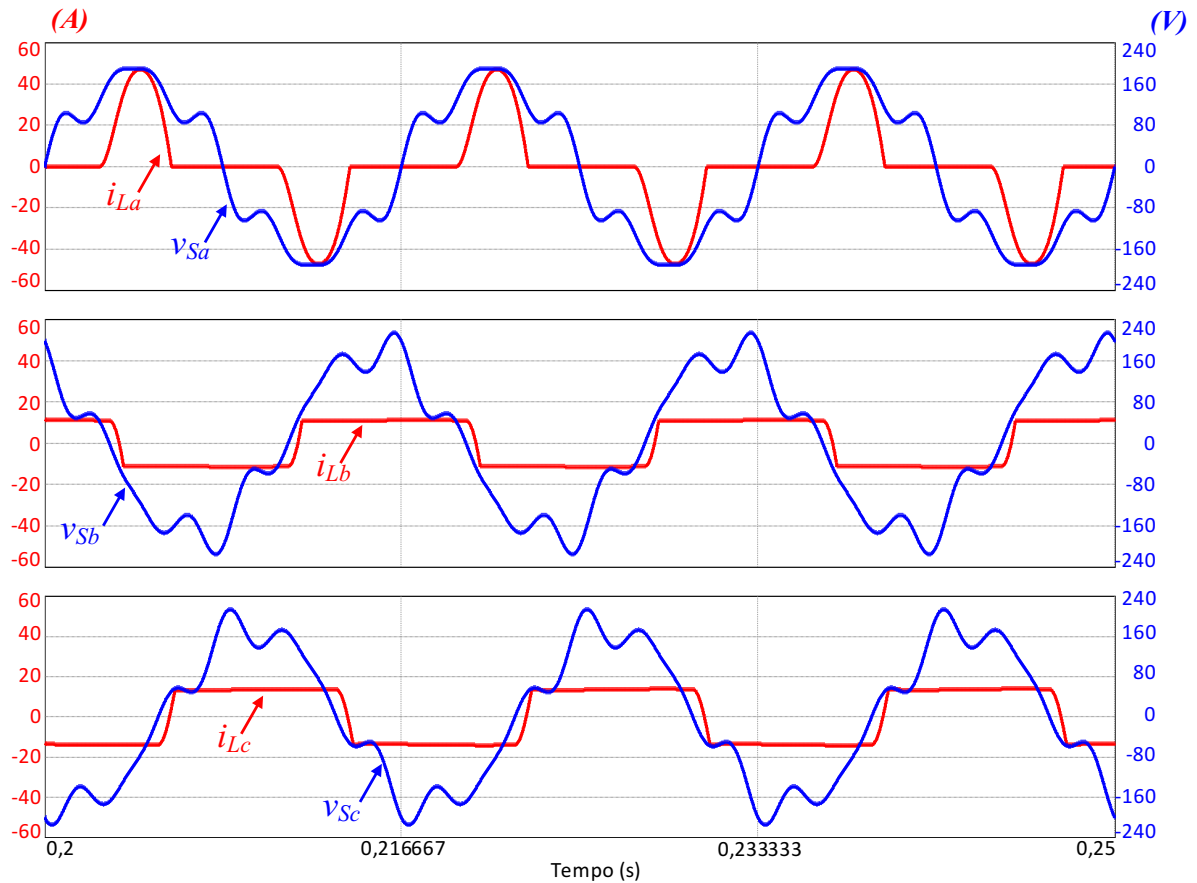


Fonte: Autoria própria.

4.1 Resultados Estáticos

Na figura 27 é apresentado a corrente da carga 3 (i_{Labc}) e a tensão da rede (v_{Sabc}) de todas as fases.

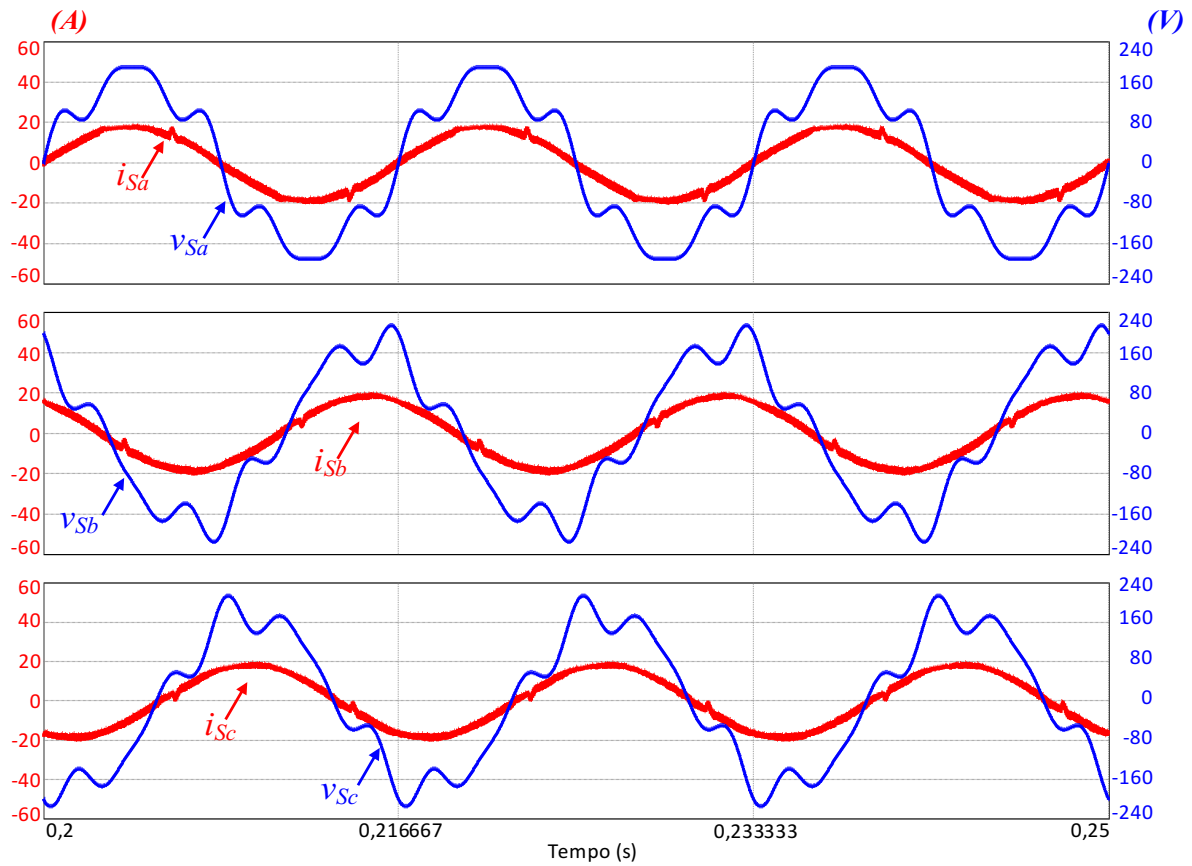
Figura 27: Tensão na rede (v_{Sabc}) e a corrente da carga 3 (i_{Labc})



Fonte: Autoria própria.

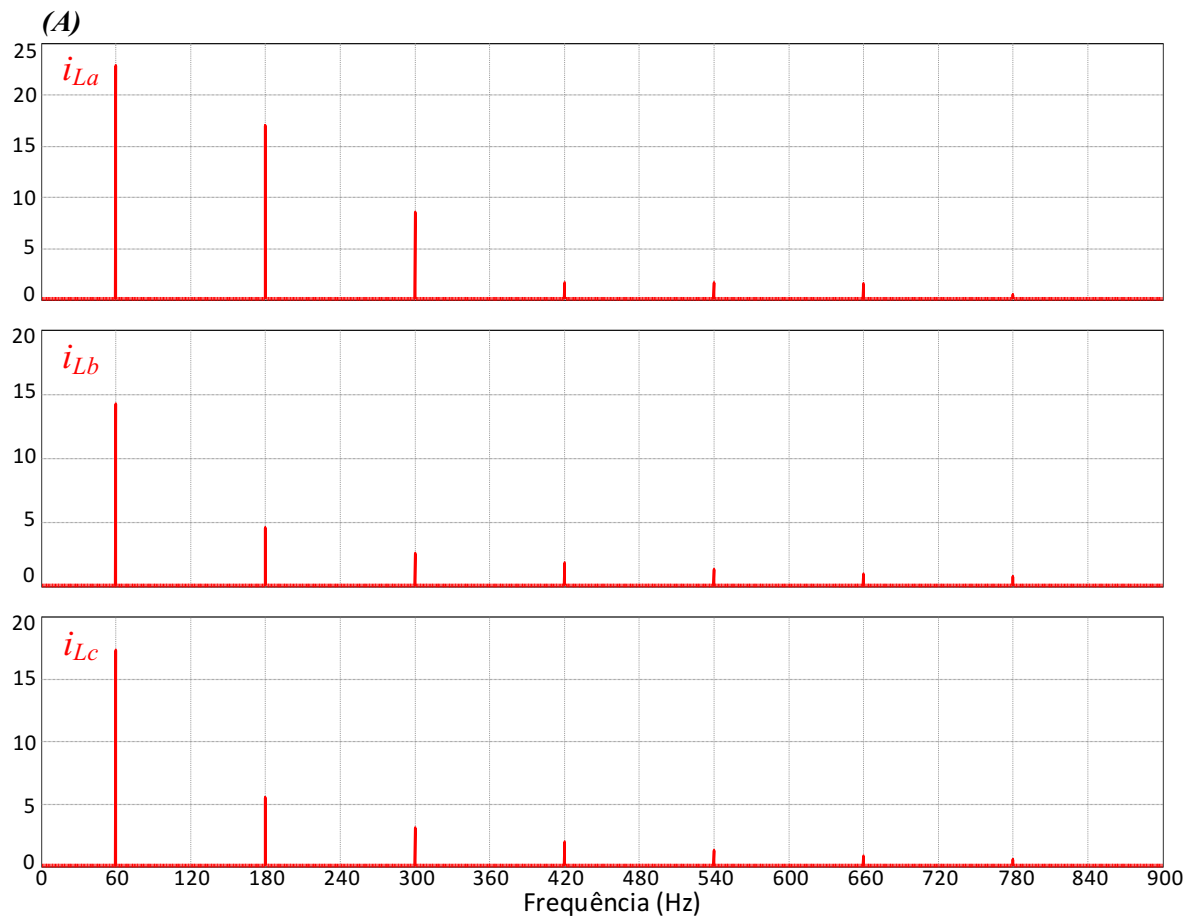
Na figura 28 por sua vez, é apresentado a tensão na rede (v_{Sabc}) e a corrente na rede (i_{Sabc}).

Figura 28: Tensão na rede (v_{Sabc}) e a corrente na rede (i_{Sabc})

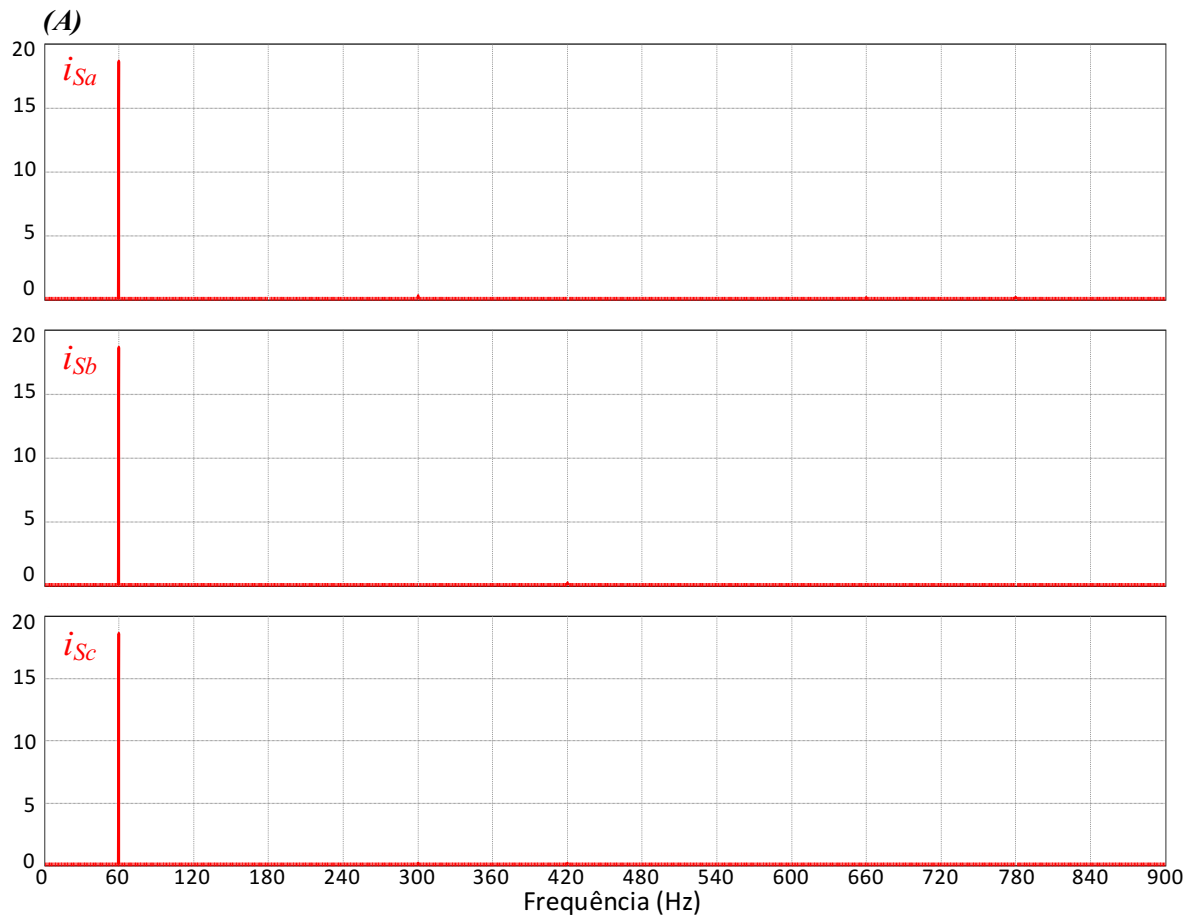


Fonte: Autoria própria.

As figuras 29 e 30 ilustram o espectro harmônico da corrente na carga 3 (il) e da corrente na rede (is) e da corrente na carga 3 (il)

Figura 29: Espectro harmônico da corrente na carga 3 (i_{Labc})

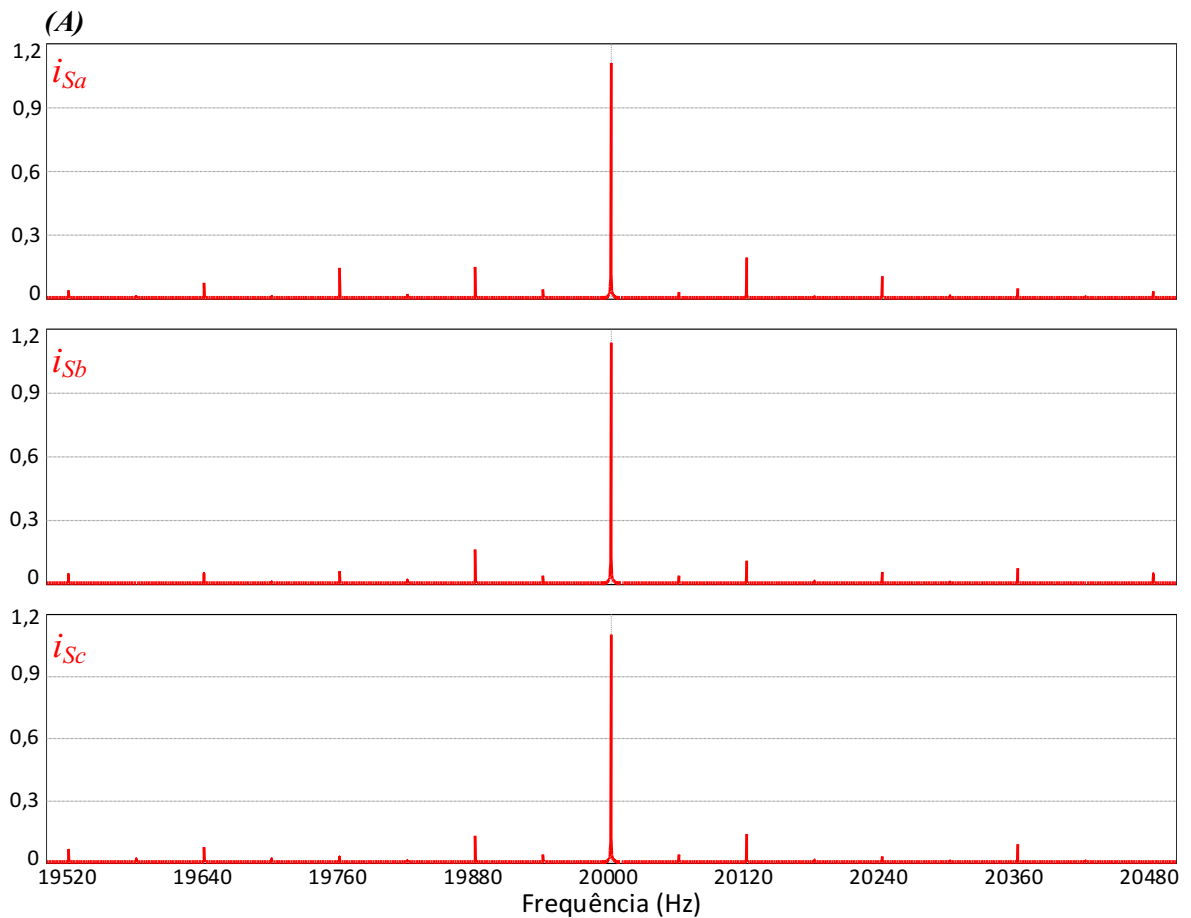
Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Espectro harmônico da corrente na rede até 900Hz (i_{Sabc})

Fonte: Autoria própria.

Na figura 30 nota-se que o filtro conseguiu compensar a maioria das harmônicas nessa faixa de frequência.

Figura 31: Espectro harmônico da corrente na rede de 19520Hz até 20480Hz (i_{Sabc})



Fonte: Autoria própria.

Entretanto na figura 31 nota-se a presença de harmônicos devido ao chaveamento do inversor. Esse padrão se repete em 40kHz, mas com uma menor amplitude.

A partir das figuras (29) e (30) é possível notar que as harmônicas consumidas pelas cargas, não são provenientes da rede.

A tabela (7) mostra individualmente as amplitudes das harmônicas até 900Hz. Onde é possível notar que houve uma redução considerável das mesmas, além de ter equilibrado a corrente fundamental nas fases.

Tabela 7 – Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 3 (I_{Labc}) e a corrente da Rede (I_{Sabc})

Amplitudes	i_1 (60Hz)	i_3 (180Hz)	i_5 (300Hz)	i_7 (420Hz)	i_9 (540Hz)	i_{11} (660Hz)	i_{13} (780Hz)	i_{15} (900Hz)
$I_{La} (A)$	22,834	16,996	8,556	1,701	1,695	1,581	0,535	0,637
$I_{Lb} (A)$	14,226	4,553	2,626	1,843	1,34	1,022	0,793	0,621
$I_{Lc} (A)$	17,092	5,509	3,095	1,994	1,325	0,892	0,589	0,376
$I_{Sa} (A)$	18,673	0,136	0,333	0,093	0,098	0,175	0,209	0,168
$I_{Sb} (A)$	18,639	0,049	0,089	0,23	0,131	0,11	0,139	0,097
$I_{Sc} (A)$	18,643	0,054	0,192	0,22	0,123	0,117	0,106	0,107

Fonte: Autoria própria.

Como mostrado na figura (31), existe um ruído de chaveamento devido a operação do inversor, que trabalha na frequência de 20KHz. E na tabela (6), são exibidas tais componentes harmônicas.

Tabela 8 – Amplitudes das componentes Harmônicas da Rede, provenientes do Ruído de Chaveamento

Frequência	19520 (Hz)	19640 (Hz)	19760 (Hz)	19880 (Hz)	20000 (Hz)	20120 (Hz)	20240 (Hz)	20360 (Hz)	20480 (Hz)
$I_{Sa} (A)$	0,041	0,078	0,148	0,152	1,111	0,198	0,109	0,052	0,035
$I_{Sb} (A)$	0,046	0,049	0,064	0,166	1,134	0,113	0,059	0,075	0,049
$I_{Sc} (A)$	0,068	0,078	0,031	0,133	1,103	0,141	0,034	0,095	0,004

Fonte: Autoria própria.

Na tabela (7) é comparado a distorção harmônica total e o fator de potência da carga e da rede.

Tabela 9 – DHT_i e fator de potência da carga e da rede

	$DHT_i(\%)$	Percentual de melhora DHT_i	Fator de Potencia	Percentual de Melhora FP
iLa	84,47	0%	0,783371	0%
iLb	41,90	0%	0,886837	0%
iLc	39,66	0%	0,880864	0%
iSa	8,80	959,88%	0,976004	24,59%
iSb	8,66	483,83%	0,977033	10,17%
iSc	8,38	473,27%	0,977847	11,01%

Fonte: Autoria própria.

Nas tabelas (8) e (9) são mostrados os resultados das cargas 1 e 2 com o filtro ativo conectado e em pleno funcionamento.

Tabela 10 – Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 1 (I_{Labc}) e a corrente da Rede

(I_{Sabc})

Amplitudes	i_1 (60Hz)	i_3 (180Hz)	i_5 (300Hz)	i_7 (420Hz)	i_9 (540Hz)	i_{11} (660Hz)	i_{13} (780Hz)	i_{15} (900Hz)
Retificador trifásico de onda completa com carga R ($R_1=17,7\Omega$)								
$I_{La} (A)$	19,476	2,634	0,442	2,107	1,718	1,264	0,798	0,622
$I_{Lb} (A)$	16,804	2,173	5,551	1,376	1,693	0,277	0,532	0,326
$I_{Lc} (A)$	17,074	0,589	5,713	2,113	1,698	1,498	0,349	0,859
$I_{Sa} (A)$	18,402	0,013	0,161	0,271	0,116	0,214	0,165	0,119
$I_{Sb} (A)$	18,406	0,009	0,282	0,265	0,161	0,055	0,073	0,151
$I_{Sc} (A)$	18,444	0,061	0,258	0,299	0,194	0,152	0,086	0,233

Fonte: Autoria própria

Tabela 11 - Amplitudes das Harmônicas de corrente da carga 1 (I_{Labc}) e a corrente da Rede (I_{Sabc})

Amplitudes	i_1 (60Hz)	i_3 (180Hz)	i_5 (300Hz)	i_7 (420Hz)	i_9 (540Hz)	i_{11} (660Hz)	i_{13} (780Hz)	i_{15} (900Hz)
Retificador Monofásico com carga R=8,1Ω e L=380mH / Retificador Monofásico com carga R=10,12Ω e L=346mH / Retificador Monofásico com carga R=13,5Ω e L=380mH								
I_{La} (A)	18,228	5,906	3,465	2,366	1,704	1,284	0,983	0,755
I_{Lb} (A)	14,145	4,497	2,565	1,779	1,255	0,927	0,691	0,515
I_{Lc} (A)	10,665	3,455	2,041	1,397	1,011	0,767	0,593	0,461
I_{Sa} (A)	14,704	0,034	0,199	0,383	0,144	0,094	0,175	0,186
I_{Sb} (A)	14,695	0,038	0,123	0,297	0,114	0,088	0,149	0,139
I_{Sc} (A)	14,702	0,015	0,197	0,279	0,072	0,065	0,069	0,162

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 – DHTi e fator de potência das cargas 1 e 2 e da rede

	Carga 1 - $DHT_i(\%)$	Carga 1 - Fator de Potencia	Carga 2 - $DHT_i(\%)$	Carga 2 - Fator de Potencia
I_{La}	21,57%	0,945933	42,30%	0,908371
I_{Lb}	38,05%	0,924091	40,92%	0,879646
I_{Lc}	38,80%	0,930676	42,53%	0,884275
I_{Sa}	8,99%	0,969186	10,79%	0,967434
I_{Sb}	8,64%	0,970411	10,85%	0,968334
I_{Sc}	8,64%	0,969017	10,82%	0,968439

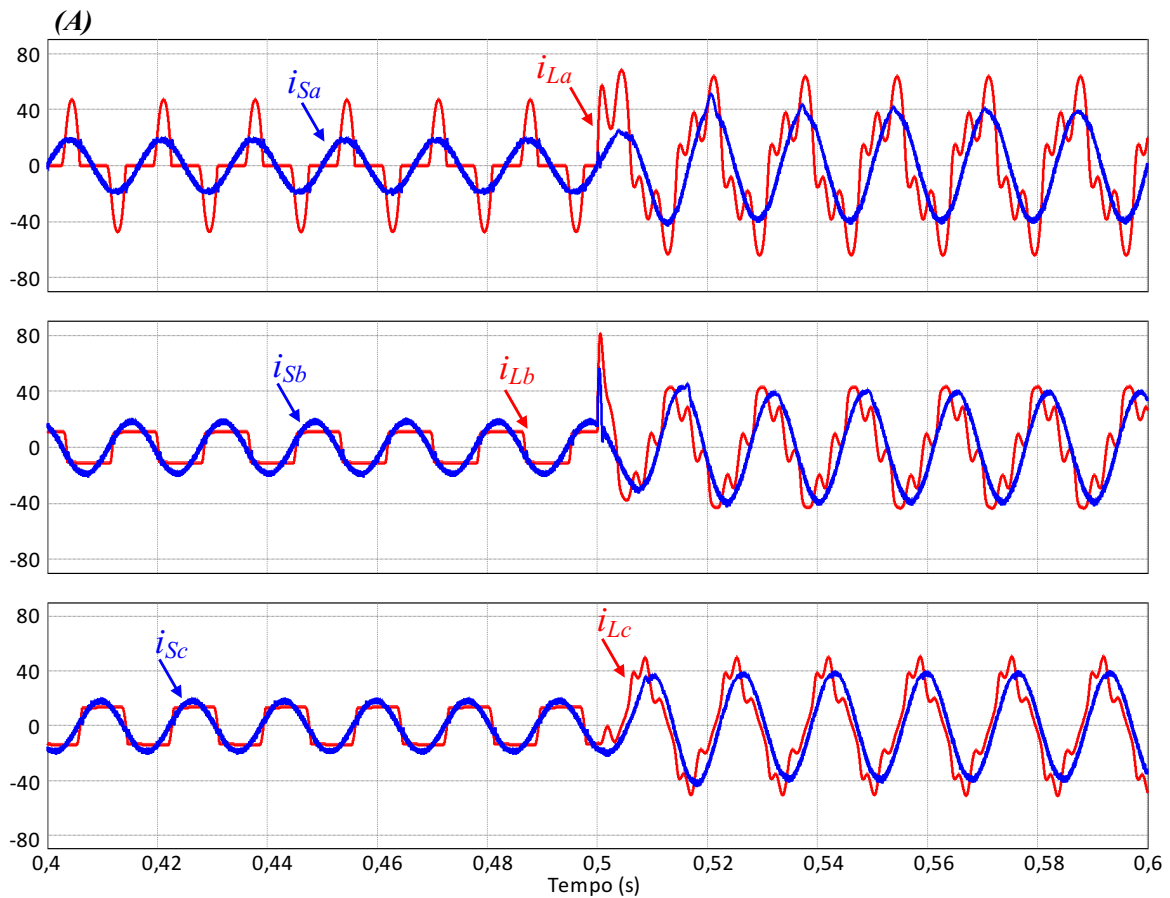
Fonte: Autoria própria.

4.2 Resultados Dinâmicos

Para verificar o desempenho dinâmico do filtro, foi acionada uma carga após o mesmo se encontrar em regime permanente. Essa carga de característica RC, foi colocar em paralelo com cada uma das fases, para gerar um degrau de carga, no instante de 500ms. Essa análise é importante para ver como o filtro reagiria com variações, especialmente o barramento CC.

Por isso são comparadas as correntes da carga e da corrente na rede, ilustrado na figura 32.

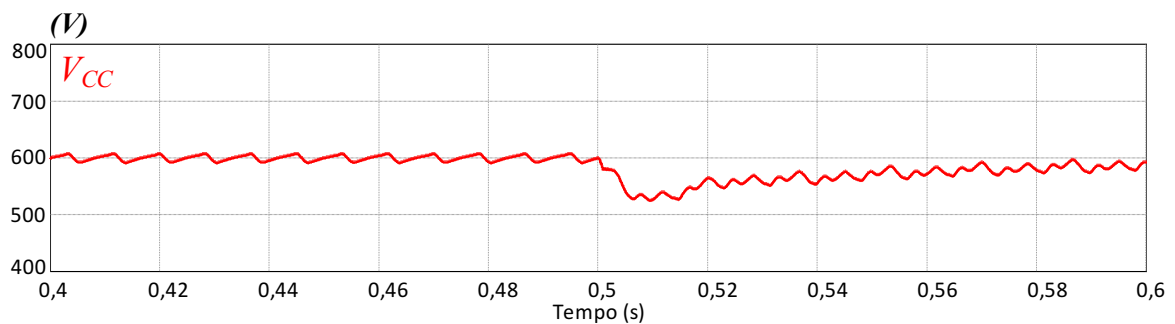
Figura 32: Corrente na carga 3 (i_{Labc}) e a corrente na rede (i_{Sabc})



Fonte: Autoria própria.

Como dito anteriormente, é importante que a tensão do barramento CC seja o mais estável possível, para que o inversor possa ter energia para gerar a corrente de compensação, por isso o gráfico 33 mostra a tensão no barramento CC quando existe uma variação na carga.

Figura 33: Tensão no barramento CC (V_{cc})



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordados principalmente questões sobre qualidade de energia no sistema elétrico com enfoque nas distorções harmônicas. Bem como possíveis problemas em equipamentos elétricos causados por tais distorções.

Entretanto o principal propósito desse trabalho foi apresentar uma solução para a mitigação das distorções harmônicas. No caso um filtro ativo de potência paralelo (FAPP) com algumas mudanças, buscando um melhor desempenho. Para a validação desse sistema foi realizado o estudo das possíveis estruturas desse filtro, como topologias de inversores, métodos de controle e também uma simulação numérica.

Como é dito no título desse trabalho, trata-se de um método de controle simplificado, que tem como vantagens um baixo custo em relação aos outros, por utilizar menos sensores. Porém esse método tem um tempo de resposta mais lento em relação a outros métodos que foram citados. Logo a melhoria proposta visa justamente melhorar o tempo de resposta, sem tornar o projeto demasiadamente caro. Pois o aspecto econômico é importantíssimo para a implementação a nível industrial. A melhoria consiste na inserção de um filtro de média móvel na malha de controle de tensão, para que o mesmo consiga atuar mais rápido sem propagar as oscilações presentes no barramento CC. Além disso, foi utilizado um sistema PLL visando melhorar a robustez do filtro, pois para gerar o sinal de referência da corrente é utilizado tal sistema, ao invés da tensão da rede, que por muitas vezes tem distorções harmônicas que seriam propagadas para a corrente.

Por tudo isso, pode se dizer que o objetivo desse trabalho era propor e estudar uma alteração na estrutura de controle de um filtro ativo, utilizando menos sensores, um sistema PLL, um filtro médio móvel e que tivesse um desempenho similar aos métodos tradicionais. Analisando os resultados pode-se dizer afirmar que tal objetivo foi alcançado, com um desempenho satisfatório. Por isso, tal estrutura simplificada se torna uma das alternativas para melhoria de problemas relacionados a qualidade de energia elétrica.

REFERÊNCIAS

ABDESLAN, D. O.; WIRA, P.; MERCKLÉ, J.; FLIELLER, D.; CHAPUIS, Y. A. A unified artificial neural network architecture for active power filters. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on.*, v. 54, n. 1, p. 61 – 76, feb. 2007

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. Applíc.* Vol. IA-20, 003, Maio/Junho.

BARBI, Ivo. *Projetos de fontes chaveadas*. Florianópolis: Edição do Autor, 2001.

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.

CHENG, Po-Tai; BHATTACHARYA, S.; DIVAN, D.. Experimental verification of dominant harmonic active filter for high-power applications. *IEEE Transactions On Industry Applications*, [S.L.], v. 36, n. 2, p. 567-577, 2000. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

GRUZS, T.m.. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. *Ieee Transactions On Industry Applications*, [s.l.], v. 26, n. 4, p.719-725, 1990. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

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

KHADKIKAR, V.; CHANDRA, A. An independent control approach for three-phase four-wire shunt active filter based on three h-bridge topology under unbalanced load conditions. In: *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008*. IEEE. Rhodes, Greece: IEEE, 2008

R. A. Modesto, S. A. O. da Silva, A. A. de Oliveira and V. D. Bacon, "A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy," *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 31, no. 8, pp. 5503-5514, 2016.

MARQUES, G. D. et al. An Improved Synchronous Reference Frame Method for Active Filters. *Eurocon 2007 - The International Conference On*, [s.l.], p.2564-2569, 2007. IEEE.

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.; 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, GramadoRS. COBEP 2013*, 2013. p. 1-6.

MODESTO, Rodrigo A. et al. A simplified strategy used to control the output voltage and the input current of a single-phase line-interactive UPS system. *2013 Brazilian Power Electronics Conference*, [s.l.], p.420-426, out. 2013. IEEE.

MODESTO, Rodrigo Augusto et al. A Versatile Unified Power Quality Conditioner Applied to Three-Phase Four-Wire Distribution Systems Using a Dual Control Strategy. *Ieee Transactions On Power Electronics*, [s.l.], v. 31, n. 8, p.5503-5514, ago. 2016. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).

MONTEIRO, M. I. M.; CADAVAL, E. R.; GONZÁLEZ, F. B. Comparison of control strategies for shunt active power filters in three-phase four-wire system. *Power Electronics, IEEE Transaction on*, v. 22, n. 1, p. 229 – 236, jan. 2007.

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.

Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (2018). PRODIST, Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica, ANEEL.

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, Enio Roberto. Filtros Ativos Série para a Compensação de Harmônicas de Tensão. 2003. 213 p. Tese (Doutor em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

SILVA, Sergio Augusto Oliveira da; NOVOCHADLO, Rhodolfo; MODESTO, Rodrigo Augusto. Single-phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems. 2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference, [s.l.], p. 4706-4711, jun. 2008.

SOUZA, F. Pottker de; BARBI, I.. Power factor correction of linear and nonlinear loads employing a single phase active power filter based on a full-bridge current source inverter controlled through the sensor of the AC mains current. 30th Annual Ieee Power

Electronics Specialists Conference. Record. (cat. No.99ch36321), [s.l.], p.387-392, 1999. IEEE.

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.