



FUNDAÇÃO
UNIVERSIDADE
FEDERAL DE
MATO GROSSO DO SUL

FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA

ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FILTRO ATIVO PARALELO (FAP) TRIFÁSICO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS DE CORRENTE UTILIZANDO TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

EDUARDO S. MOREIRA

**CAMPO GRANDE, MS
2020**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E
GEOGRAFIA - FAENG
ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FILTRO ATIVO PARALELO
(FAP) TRIFÁSICO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS DE
CORRENTE UTILIZANDO TEORIA DA POTÊNCIA
CONSERVATIVA**

EDUARDO S. MOREIRA

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

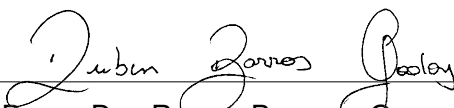
Orientador:
Prof. Dr. Ruben Barros Godoy.

**CAMPO GRANDE, MS
2020**

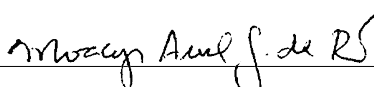
**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE FILTRO ATIVO PARALELO (FAP)
TRIFÁSICO PARA CORREÇÃO DE HARMÔNICOS DE CORRENTE
UTILIZANDO TEORIA DA POTÊNCIA CONSERVATIVA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul na Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, para obtenção da Graduação em Engenharia Elétrica.

Banca Examinadora:



PROF. DR. RUBEN BARROS GODOY



PROF. DR. MOACYR AURELIANO GOMES DE BRITO



PROF. DR. TIAGO HENRIQUE DE ABREU MATEUS

**CAMPO GRANDE, MS
2020**

DECLARAÇÃO DE AUTORIA E RESPONSABILIDADE

Eduardo Silva Moreira, residente e domiciliado na cidade de Campo Grande, Estado do Mato Grosso do Sul, portador do RG de nº 2.094.761 e CPF nº 064.500.851-69, declaro que o Trabalho de Conclusão de Curso apresentado, com o título **Modelagem e simulação de filtro ativo paralelo (FAP) trifásico para correção de harmônicos de corrente utilizando Teoria da Potência Conservativa** é de minha autoria e assumo a total responsabilidade pelo seu conteúdo e pela originalidade do texto. Declaro que identifiquei e referenciei todas as fontes e informações gerais que foram utilizadas para construção do presente texto. Declaro também que este artigo não foi publicado, em parte, na íntegra ou conteúdo similar em outros meios de comunicação, tendo sido enviado com exclusividade para a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

Campo Grande, 25 de novembro de 2020.

Eduardo Silva Moreira
Eduardo Silva Moreira

Dedico este trabalho à minha mãe e ao meu irmão.

Agradecimentos

Agradeço imensamente à Deus por ter permitido que eu tivesse uma família maravilhosa que me apoiou em todas as minhas decisões e sempre esteve presente me proporcionando esta oportunidade. Cada momento difícil superado foi para orgulhá-los e retribuir o amor e carinho em mim depositado, retribuir tudo que fizeram por mim foi minha maior motivação sempre.

Os agradecimentos se estendem ao professor Dr. Ruben Barros Godoy, orientador deste trabalho. A oportunidade dada de trabalhar tal tema no final da graduação foi extremamente importante para minha evolução enquanto estudante e profissional, foi um privilégio ser orientado por um professor tão comprometido, competente e admirado pelos seus pares e pelos alunos.

Agradeço à todos os professores do curso pelo conhecimento compartilhado ao longo de 5 anos de aulas, muitos trabalhos e laboratórios. Pela equipe de docentes do curso de engenharia elétrica da UFMS tenho eterna gratidão e admiração.

Por fim, agradeço à todos meus colegas e amigos do curso que participaram desta caminhada, longa caminhada que não teria sido possível sem a ajuda mútua e parceria nos bons momentos de estudo e de descontração. As boas lembranças irão perdurar junto com a gratidão de poder aprender com todos.

Resumo

Este trabalho é pautado na aplicação da Teoria de Potência Conservativa para simulação de um Filtro Ativo Paralelo. A fim de corrigir harmônicos de corrente, no ambiente de simulação MATLAB/Simulink[®], foi desenvolvida a aplicação da teoria para que o filtro pudesse processar as parcelas de potência extra potência ativa. O objetivo principal é aplicar a teoria em um dispositivo eletrônico de potência capaz de mitigar problemas de qualidade de energia. Este trabalho se diferencia de outros que também abordam a implementação de FAP's com a Teoria de Potência Conservativa, alvo principal da revisão bibliográfica do presente trabalho, por aplicar as formas de onda de correntes extraídas do estudo como modulantes do inversor de tensão. Esta teoria é capaz de fornecer embasamento matemático que propicia uma análise de potência capaz de distinguir a contribuição do conteúdo harmônico presente no sistema elétrico estudado e isolá-lo, permitindo a devida compensação. O trabalho traz a compensação de um sistema CA com uma carga RL junto de uma carga resistiva alimentada por um retificador com filtro capacitivo - fonte do conteúdo harmônico - no qual o FAP compõe o sistema com o intuito de blindar a fonte CA das distorções oriundas da carga não linear. Os resultados obtidos foram exitosos ao observar a forma de onda senoidal de corrente da fonte CA com a atuação do FAP, que é comandado por controladores de corrente e tensão que tem como referência as informações fornecidas pela aplicação da teoria alvo da revisão bibliográfica. Quando o filtro não está atuando é nítido o impacto na forma de onda de corrente da fonte que fica completamente distorcida. Por fim, conclui-se que a aplicação da Teoria de Potência Conservativa em Filtros Ativos Paralelos se mostra uma eficaz e versátil maneira de compensar sistemas com conteúdo harmônico devido à cargas não lineares.

Palavras-chave: Teoria de Potência Conservativa, Filtro Ativo Paralelo, Conteúdo Harmônico, Retificador, Compensação.

Abstract

This work is based on the application of Conservative Power Theory for simulation of a Parallel Active Filter. In order to correct current harmonics, in the MATLAB / Simulink[®] simulation environment, the application of the theory was developed so that the filter could process the extra power portions of active power. The main objective is to apply the theory to an electronic power device capable of mitigating power quality problems. This work differs from others that also address the implementation of FAP's with the Conservative Power Theory, the main target of the bibliographic review of the present work, for applying the current waveforms extracted from the study as modulators of the voltage inverter. This theory is able to provide a mathematical basis that provides a power analysis capable of distinguishing the contribution of the harmonic content present in the studied electrical system and isolating it, allowing for proper compensation. The work brings the compensation of an AC system with an RL load along with a resistive load powered by a capacitive filter rectifier - source of harmonic content - in which the FAP composes the system in order to shield the AC source from distortions originating from non-linear load. The results obtained were successful when observing the current sine waveform of the AC source with the action of the FAP, which is controlled by current and voltage controllers that have as reference the information provided by the application of the target theory of the literature review. When the filter is not working, the impact on the current waveform of the source is clearly visible, which is completely distorted. Finally, it is concluded that the application of the Conservative Power Theory in Parallel Active Filters is an effective and versatile way to compensate systems with harmonic content due to non-linear loads.

Keywords: Conservative Power Theory, Parallel Active Filter, Harmonic Content, Rectifier, Compensation.

Sumário

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Lista de Símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	1
1.3 Estrutura	2
2 CPT aplicada em filtros ativos paralelos	3
2.1 Teoria para sistemas elétricos monofásicos e trifásicos	3
2.1.1 Definições e operadores matemáticos	4
2.1.2 Definições de potência, energia e corrente elétrica	5
2.1.3 Expansão das definições de potência, energia e corrente elétrica para circuitos trifásicos	7
2.2 Aplicação em sistemas de energia	8
2.2.1 Cálculo das parcelas de corrente de um sistema elétrico CA mo- nofásico	8
2.2.2 Cálculo das parcelas de corrente de um sistema elétrico CA trifásico	11
2.2.3 Fator de potência e qualidade de energia	12
3 Metodologia de projeto dos filtros paralelos	15
3.1 Indutores	16
3.1.1 FAP Monofásico	18
3.2 Capacitores	18
3.3 Transdutores	19
3.4 Esforços de corrente e tensão dos interruptores	21
4 Estratégia de controle e projeto dos controladores	25
4.1 Malha de corrente	26
4.2 Malha de tensão	27
4.3 FAP monofásico	28
4.4 FAP trifásico	31
5 Resultados de simulação e análise de casos	33

5.1 FAP monofásico	33
5.2 FAP trifásico	39
6 Conclusão e trabalhos futuros	46
6.1 Trabalhos futuros	47
Referências Bibliográficas	48

Lista de Figuras

Figura 1	Grandezas elétricas sensoriadas em um sistema monofásico.	9
Figura 2	Cálculo da corrente ativa via software MATLAB/Simulink®.	9
Figura 3	Cálculo da corrente reativa via software MATLAB/Simulink®.	10
Figura 4	Implementação da teoria de potência conservativa em um sistema monofásico.	10
Figura 5	Grandezas elétricas sensoriadas em um sistema trifásico.	11
Figura 6	Conversão dos valores de linha em valores de fase das grandezas elétricas sensoriadas.	12
Figura 7	Implementação da teoria de potência conservativa em um sistema trifásico.	13
Figura 8	Topologia para o FAP monofásico.	15
Figura 9	Topologia para o FAP trifásico.	16
Figura 10	Topologia trifásica de um inversor de frequência.	22
Figura 11	SEMIKRON SEMITOP SK25GB12T4.	23
Figura 12	Topologia monofásica de um inversor de frequência.	23
Figura 13	SEMIKRON SEMITOPSK15GH066.	24
Figura 14	Estratégia de controle em diagrama de blocos.	25
Figura 15	Estratégia de controle em diagrama de blocos.	28
Figura 16	Diagrama de Bode para malha de corrente do FAP.	29
Figura 17	Diagrama de Bode para malha de tensão do FAP.	30
Figura 18	Estratégia de controle FAP monofásico.	30
Figura 19	Estratégia de controle FAP trifásico.	31
Figura 20	Sistema CA - Fonte e Carga.	34
Figura 21	Formas de onda da tensão e da corrente do sistema da Figura 20.	34
Figura 22	Formas de onda das correntes de carga, ativa, reativa e residual, respectivamente, do sistema da Figura 20.	35
Figura 23	Sistema CA com FAP.	36
Figura 24	Formas de onda do sistema CA sendo compensado (reativo e residual) pelo FAP.	37
Figura 25	Formas de onda do sistema CA sendo compensado (apenas residual) pelo FAP.	38
Figura 26	Formas de onda do sistema CA tendo a parcela residual de corrente compensada pelo FAP e a parcela reativa pelo banco de capacitores.	39
Figura 27	Sistema CA - Fonte e Carga.	40

Figura 28	Formas de onda da tensão e da corrente - fase A - do sistema da	
	Figura 27.	40
Figura 29	Formas de onda das correntes de carga, ativa, reativa e residual do	
	sistema trifásico da Figura 27.	41
Figura 30	Sistema CA com FAP.	42
Figura 31	Formas de onda - fase A - do sistema CA sendo compensado (reativo	
	e residual) pelo FAP.	43
Figura 32	Formas de onda - fase A - sistema CA sendo compensado (apenas	
	residual) pelo FAP.	44
Figura 33	Formas de onda - fase A - do sistema CA tendo a parcela residual	
	de corrente compensada pelo FAP e a parcela reativa pelo banco de	
	capacitores.	44

Lista de Tabelas

Tabela 1	Parâmetros para o projeto do indutor L_f do FAP 3 ϕ .	16
Tabela 2	Características do indutor L_f do FAP 3 ϕ .	18
Tabela 3	Parâmetros para o projeto do indutor L_f do FAP 1 ϕ .	18
Tabela 4	Características do indutor L_f do FAP 1 ϕ .	18
Tabela 5	Transdutores para o FAP 3 ϕ .	20
Tabela 6	Transdutores para o FAP 1 ϕ .	21
Tabela 7	IGBT para o FAP 3 ϕ .	22
Tabela 8	IGBT para o FAP 1 ϕ .	24
Tabela 9	Parâmetros para o controlador de corrente.	29
Tabela 10	Parâmetros para o controlador de tensão.	29

Lista de Símbolos

$\hat{U}$	Integral imparcial da tensão do sistema elétrico - valor RMS	V
$\hat{u}$	Integral imparcial da tensão do sistema elétrico - valores em função do tempo	V
$\hat{U}_n$	Integral imparcial da tensão de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valor RMS	V
$\hat{u}_n$	Integral imparcial da tensão de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valores em função do tempo	V
λ	Fator de Potência do sistema elétrico	—
A_e	Área da seção transversal da perna central do núcleo	cm ²
A_w	Área disponível (janela) no carretal para alocação dos condutores	cm ²
B_{max}	Máxima densidade de fluxo magnético	T
f_s	Frequência de chaveamento do inversor	Hz
I	Corrente do sistema elétrico - valor RMS	A
i	Corrente do sistema elétrico - valores em função do tempo	A
i_a	Corrente ativa do sistema elétrico - valores em função do tempo	A
i_{an}	Corrente ativa de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valores em função do tempo	A
i_n	Corrente de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valores em função do tempo	A
I_p	Corrente de pico	A
i_r	Corrente reativa do sistema elétrico - valores em função do tempo	A
i_{rn}	Corrente reativa de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valores em função do tempo	A
i_v	Corrente residual do sistema elétrico - valores em função do tempo	A

i_{vn}	Corrente residual de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico - valores em função do tempo	A
I_{ef}	Corrente eficaz	A
J_{max}	Máxima densidade de corrente no condutor	$\frac{A}{cm^2}$
k_w	Fator de utilização da janela do carretel	—
L	Indutância	H
$P, \bar{p}$	Potência ativa do sistema elétrico	W
P_n	Potência ativa de uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico	W
S	Potência aparente do sistema elétrico	VA
U	Tensão do sistema elétrico - valor RMS	V
u	Tensão do sistema elétrico - valores em função do tempo	V
V_p	Tensão de pico da tensão senoidal	V
V_F, V_{cc}	Tensão do barramento de capacitores do Filtro Ativo Paralelo	V
$W, \bar{w}$	Energia reativa do sistema elétrico	J
W_n	Energia reativa para uma fase qualquer de um sistema elétrico polifásico	J
C_f	Valor de capacitância do FAP	F
CA	Corrente Alternada	—
CC	Corrente Contínua	—
CPT	Teoria de Potência Conservativa	—
D	Ciclo de trabalho do chaveamento do inversor	—
FAP	Filtro Ativo Paralelo	—
FTMC	Função de Transferência da Malha de Corrente	—
FTMT	Função de Transferência da Malha de Tensão	—
L_f	Valor de indutância do FAP	H
LTK	Lei das Tensões de Kirchhoff	—
MITs	Motores Trifásicos de Indução	—
PID	Controlador Proporcional Integral Derivativo	—
RL	Carga composta por uma resistência e uma indutância	Ω

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O crescente uso de cargas não lineares, que trazem como consequência imediata a demanda de correntes com elevado conteúdo harmônico, tem sido motivo de preocupação para o setor elétrico. Retificadores controlados e não controlados assim como inversores podem inserir harmônicos no sistema, situação que sobrecarrega a rede elétrica e pode levar ao mau funcionamento de equipamentos, inclusive os de proteção. Portanto, se faz necessária a implantação de dispositivos que visam minimizar os impactos técnicos e econômicos de correntes que não estejam ligadas ao transporte de potência ativa. O FAP se mostra uma boa solução para a minimização de correntes harmônicas ou reativas, de modo que seu estudo e domínio da técnica e de teorias correlatas aos fenômenos que envolvem sistemas elétricos se tornam fundamentais ao engenheiro e demais profissionais do ramo da eletricidade.

1.2 Objetivo

Estudar e simular através do MATLAB/Simulink[®] uma topologia de filtro ativo para correção de correntes não ativas oriundas de cargas não lineares conectadas a um sistema elétrico. O foco maior está no controle da planta, pois envolve a aplicação da moderna teoria conservativa de potência, alvo de estudo no trabalho.

1.3 Estrutura

A fim de organizar o conteúdo exposto de forma que haja uma maior facilidade por parte do leitor de compreender o trabalho apresentado neste documento, a estrutura do texto é apresentada a seguir.

Para dar embasamento teórico e apresentar os princípios físicos e matemáticos da teoria abordada, o capítulo 2 apresenta a Teoria de Potência Conservativa no ambiente de sistemas elétricos monofásicos e trifásicos; ainda no capítulo 2 é explicada a aplicação de FAPs em sistemas de energia, de modo a ilustrar sua função e importância para solução de problemas relacionados à presença de conteúdo harmônico nas redes elétricas. O capítulo 3 apresenta o dimensionamento dos elementos físicos do filtro: capacitores, indutores e interruptores; de modo a possibilitar a confecção de um protótipo. Neste capítulo será abordado o dimensionamento tanto para o FAP monofásico bem como o trifásico. Para que o filtro possa processar a potência adequada referente ao conteúdo harmônico - eventualmente também a potência reativa - faz necessário o uso de uma malha de controle para a corrente e outra para a tensão do FAP, o capítulo 4 aborda essa estratégia de controle do dispositivo expondo a metodologia que se utiliza da teoria conservativa de potência para analisar o sistema e fornecer os parâmetros necessários para o controle do filtro.

Finalmente, no Capítulo 5 é feita a análise dos resultados de simulação e algumas análises de caso para explorar a funcionalidade do FAP e ilustrar seu desempenho e papel em sistemas de energia; este capítulo é o fruto principal de todo o trabalho desenvolvido. Por fim, no capítulo 6 aborda-se a conclusão a respeito de tudo que foi exposto e um balanço referente a expectativa inicial e o resultado final; tem-se ainda um debate sobre trabalhos futuros envolvendo o assunto em questão.

Capítulo 2

CPT aplicada em filtros ativos paralelos

2.1 Teoria para sistemas elétricos monofásicos e trifásicos

Em resposta aos desafios e problemáticas apresentadas ao longo do desenvolvimento industrial e o avanço das tecnologias referentes a equipamentos eletroeletrônicos para o conforto e praticidade da população, a eletrônica analógica e digital tornaram-se cada vez mais presentes nos sistemas elétricos em corrente alternada (CA). A solução de problemas envolvendo o processamento e a conversão de energia elétrica trouxe o conceito de eletrônica de potência, grande responsável por revolucionar o uso da eletricidade e trazer novas propostas e possibilidades para o consumo de energia elétrica.

No entanto, aquilo que se mostrou revolucionário para a indústria e consumo comercial e residencial acabou por introduzir nos sistemas elétricos uma nova problemática relacionada à qualidade das formas de onda de tensão e corrente dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. A partir desse momento inicia-se uma discussão sobre os harmônicos introduzidos nas redes elétricas que degradam o sistema projetado originalmente para funcionar apenas à frequência fundamental de 50 ou 60 Hertz, com isso a teoria convencional - teoria ABC - atualmente se mostra ultrapassada para analisar a atual complexidade dos sistemas elétricos repletos de processos de conversão eletrônica de energia, a exemplo dos processos de retificação para

uso de equipamentos em corrente contínua (CC).

A fim de propor um estudo que seja capaz de traduzir o atual caráter dos sistemas de energia a Teoria Conservativa de Potência, [3, 9, 10], apresenta conceitos físicos e matemáticos capazes de traduzir a real complexidade da análise de potência demandada pelos usuários das redes elétricas para realização das mais diversas atividades que demandam eletricidade, insumo essencial para todas as áreas de desenvolvimento humano e tecnológico do planeta, vale ressaltar também que é a única teoria que decompõe a corrente em parcelas com significado físico.

2.1.1 Definições e operadores matemáticos

Para aplicar os conceitos da teoria conservativa de potência com clareza é necessário recorrer a algumas definições e operadores matemáticos fundamentais para a abordagem no ambiente de simulação, objetivo maior deste trabalho.

Para variáveis "x" e "y" quaisquer definidas em um período "T" tem-se as seguintes definições de [9, 10]:

- Valor médio:

$$\bar{x} = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) dt \quad (2.1)$$

- Derivada no tempo:

$$\tilde{x} = \frac{dx}{dt} \quad (2.2)$$

- Integral no tempo:

$$x_f = \int_0^t x(\tau) d\tau \quad (2.3)$$

- Integral imparcial:

$$\hat{x} = x_f - \bar{x}_f \quad (2.4)$$

- Produto interno:

$$\langle x, y \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t) dt \quad (2.5)$$

- Valor RMS:

$$X = \|x\| = \sqrt{\langle x, x \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (2.6)$$

- Ortogonalidade:

$$\langle x, y \rangle = 0 \quad (2.7)$$

Para vetores " $\underline{x}$ " e " $\underline{y}$ " quaisquer definidas em um período " T " tem-se as seguintes definições de [9, 10]:

- Produto escalar:

$$\underline{x} \circ \underline{y} = \sum_{n=1}^N x_n \cdot y_n \quad (2.8)$$

- Magnitude:

$$|x| = \sqrt{\underline{x} \circ \underline{y}} = \sqrt{\sum_{n=1}^N x_n^2} \quad (2.9)$$

- Produto interno:

$$\langle \underline{x}, \underline{y} \rangle = \langle \underline{x} \circ \underline{y} \rangle = \sum_{n=1}^N \langle x_n, y_n \rangle = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^N \int_0^T x_n(t) \cdot y_n(t) dt \quad (2.10)$$

- Valor RMS:

$$X = ||\underline{x}|| = \sqrt{\sum_{n=1}^N \langle x_n, x_n \rangle} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^N \int_0^T x_n^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{n=1}^N X_n^2} \quad (2.11)$$

- Ortogonalidade:

$$\langle \underline{x}, \underline{y} \rangle = 0 \quad (2.12)$$

2.1.2 Definições de potência, energia e corrente elétrica

Aplicando as definições matemáticas supracitadas define-se uma nova abordagem para o cálculo da corrente reativa, utilizando a energia reativa (conservativa), [9, 10]:

$$W = \overline{w} = \langle \hat{u}, i \rangle \quad (2.13)$$

O conceito de potência ativa se mantém de teorias anteriores:

$$P = \bar{p} = \langle u, i \rangle \quad (2.14)$$

Potência ativa e energia reativa são grandezas chave para a correta separação das parcelas de corrente do sistema elétrico levando em conta a influência de conteúdo harmônico.

Por fim, tem-se a potência aparente já conceituada em sistemas elétricos, diferentemente da potência ativa e da energia reativa não é conservativa, se trata de um parâmetro para caracterizar o uso de redes elétricas. Sendo definida da seguinte forma:

$$S = ||u|| \cdot ||i|| = U \cdot I \quad (2.15)$$

Finalmente serão apresentadas as definições de corrente ativa, reativa e residual, esta última evidencia a presença de harmônicos de corrente na rede proveniente do funcionamento característico de cargas não lineares.

Define-se corrente ativa como o valor mínimo de corrente necessário para transmitir potência ativa por um sistema elétrico, a definição matemática é apresentada por (2.16).

$$i_a = \frac{\langle u, i \rangle}{||u||^2} \cdot u = \frac{P}{U^2} \cdot u \quad (2.16)$$

Define-se corrente reativa como o valor mínimo de corrente necessário para transmitir energia reativa, a definição matemática é apresentada:

$$i_r = \frac{\langle \hat{u}, i \rangle}{||\hat{u}||^2} \cdot \hat{u} = \frac{W}{\hat{U}^2} \cdot \hat{u} \quad (2.17)$$

Por fim, a corrente residual se dá pela diferença entre a corrente total, tomando como totalidade a potência aparente, e a soma das correntes ativa e reativa, a definição

matemática é apresentada:

$$i_v = i - (i_a + i_r) \quad (2.18)$$

2.1.3 Expansão das definições de potência, energia e corrente elétrica para circuitos trifásicos

Compreendidas as definições matemáticas e sua aplicação para sistemas faz-se agora uma abordagem similar para sistemas trifásicos, foco da simulação do FAP explorado neste trabalho, definições essas aprofundadas em [9, 10].

Para as correntes ativas de cada fase i_{an} , cuja definição já exposta na subseção anterior se mantém, tem-se $n = 1, 2$ e 3 para um sistema trifásico a 3 ou 4 fios. A definição matemática é exposta em:

$$i_{an} = \frac{\langle u_n, i_n \rangle}{||u_n||^2} \cdot u_n = \frac{P_n}{U_n^2} \cdot u_n \quad (2.19)$$

De posse dos valores de corrente ativa e tensão por fase, a potência ativa total é definida da seguinte forma:

$$P = \langle \underline{u}, \underline{i}_a \rangle \quad (2.20)$$

Para as correntes reativas de cada fase i_{rn} , cuja definição já exposta na subseção anterior se mantém, tem-se $n = 1, 2$ e 3 para um sistema trifásico a 3 ou 4 fios. A definição matemática é exposta em:

$$i_{rn} = \frac{\langle \hat{u}_n, i_n \rangle}{||\hat{u}_n||^2} \cdot \hat{u}_n = \frac{W_n}{\hat{U}_n^2} \cdot \hat{u}_n \quad (2.21)$$

De posse dos valores de corrente reativa e tensão por fase, a energia reativa total é definida da seguinte forma:

$$W = \langle \hat{u}, \underline{i}_r \rangle \quad (2.22)$$

Por fim, a corrente residual de cada fase i_{vn} se dá pela diferença entre a corrente total, tomando como totalidade a potência aparente, e a soma das correntes ativa e reativa, a definição matemática é apresentada:

$$i_{vn} = i_n - (i_{an} + i_{rn}) \quad (2.23)$$

2.2 Aplicação em sistemas de energia

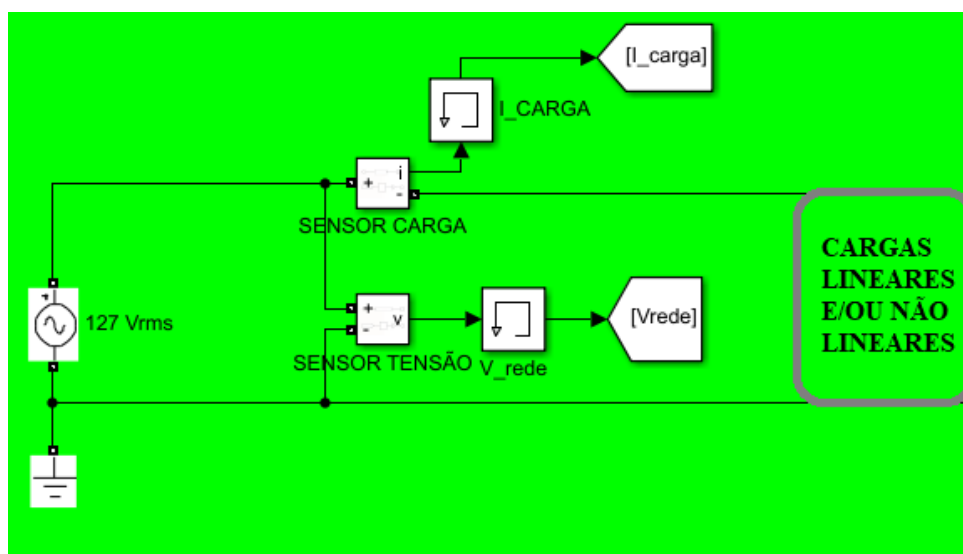
Para tornar claro o uso da teoria de potência conservativa em circuitos elétricos esta seção aborda a implementação de uma rotina de cálculos para de fato distinguir cada parcela de corrente em um sistema monofásico e também em um sistema trifásico. Ainda será feita uma análise sobre sua importância para conceitos importante em redes elétricas alternadas.

2.2.1 Cálculo das parcelas de corrente de um sistema elétrico CA monofásico

Afim de aplicar os fundamentos da teoria estudada na seção anterior, utilizou-se o software MATLAB/Simulink[®] para implementar os cálculos via diagrama de blocos para obter cada parcela de corrente de um sistema elétrico CA em estudo.

Para um sistema monofásico faz-se o sensoriamento da tensão da fonte e da corrente drenada pela carga, conforme ilustrado na Figura 1. A partir desses dois parâmetros é possível aplicar os princípios da teoria abordada e ao final do processo obter as correntes ativa, reativa e residual.

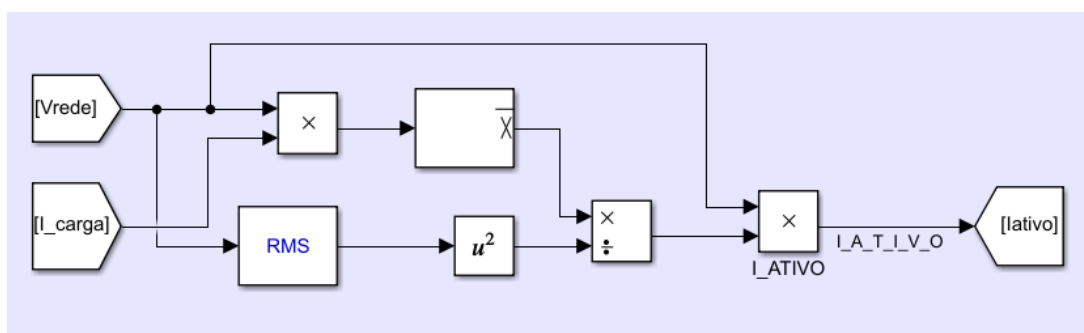
FIGURA 1. Grandezas elétricas sensoriadas em um sistema monofásico.



Fonte: próprio autor.

A primeira parcela de corrente a ser calculada é a ativa, a Figura 2 ilustra a aplicação da Equação 2.16 em diagrama de blocos.

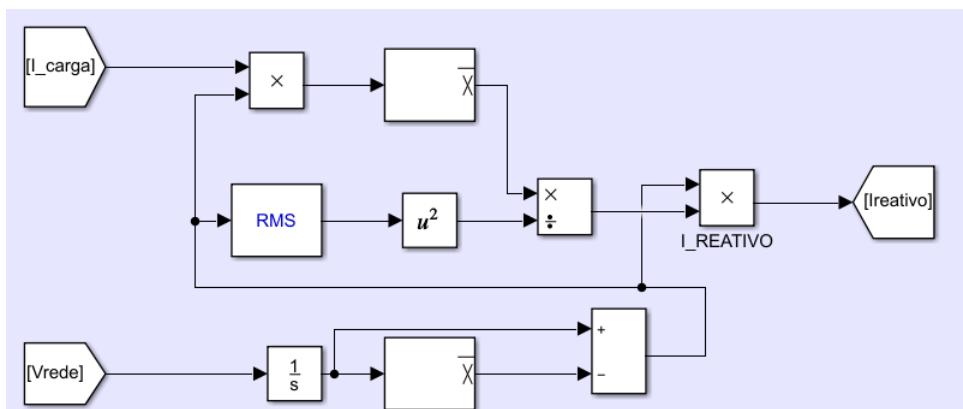
FIGURA 2. Cálculo da corrente ativa via software MATLAB/Simulink®.



Fonte: próprio autor.

A segunda parcela de corrente a ser calculada é a reativa, a Figura 3 ilustra a aplicação da Equação 2.17 em diagrama de blocos. Por fim, a terceira parcela de corrente a ser calculada é a residual, resultante da Equação 2.18.

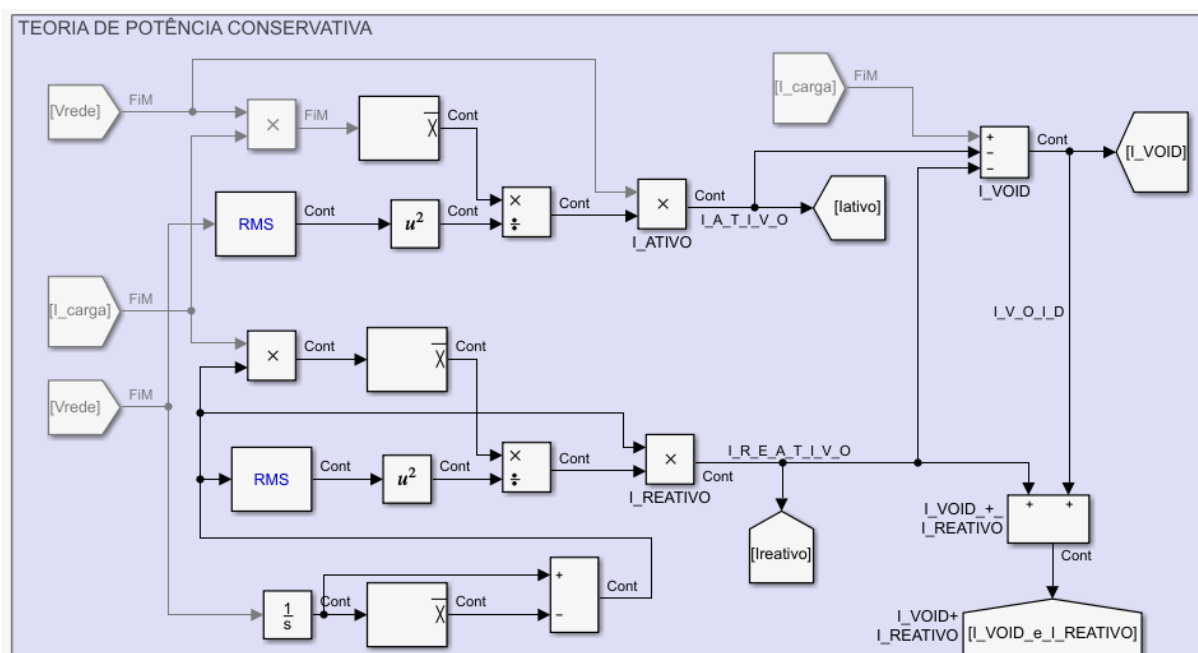
FIGURA 3. Cálculo da corrente reativa via software MATLAB/Simulink®.



Fonte: próprio autor.

O processo completo é apresentado na Figura 4.

FIGURA 4. Implementação da teoria de potência conservativa em um sistema monofásico.

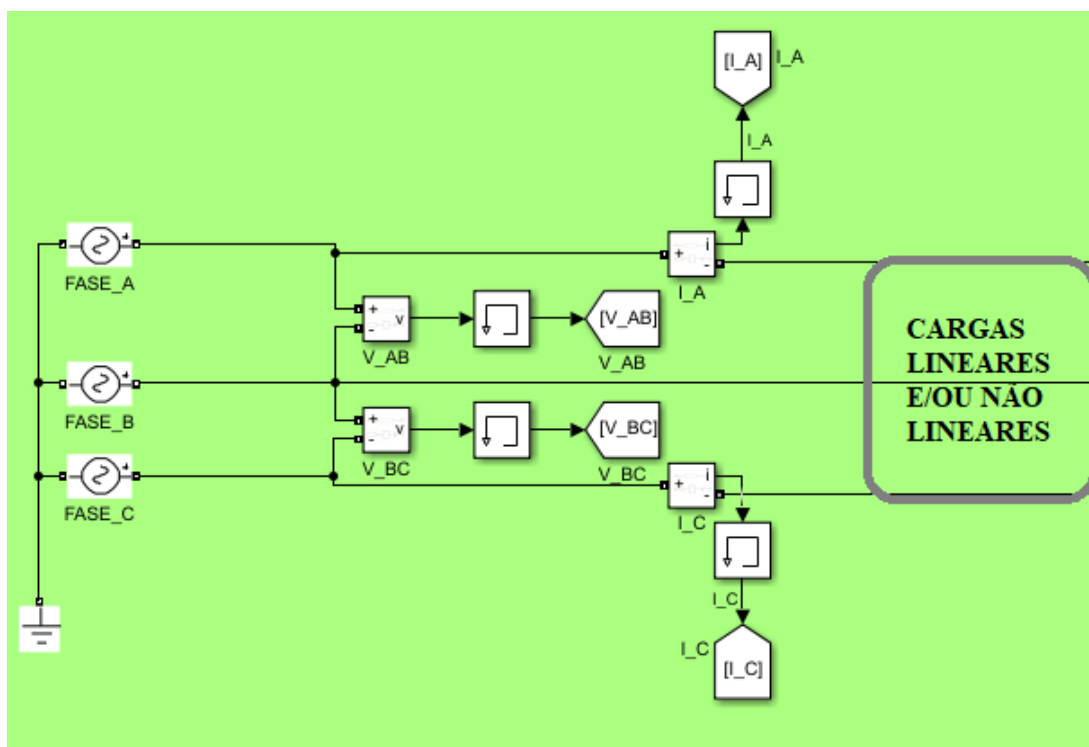


Fonte: próprio autor.

2.2.2 Cálculo das parcelas de corrente de um sistema elétrico CA trifásico

Para um sistema trifásico faz-se o sensoriamento das tensões entre fases e das correntes de linha da carga, conforme ilustrado na Figura 5.

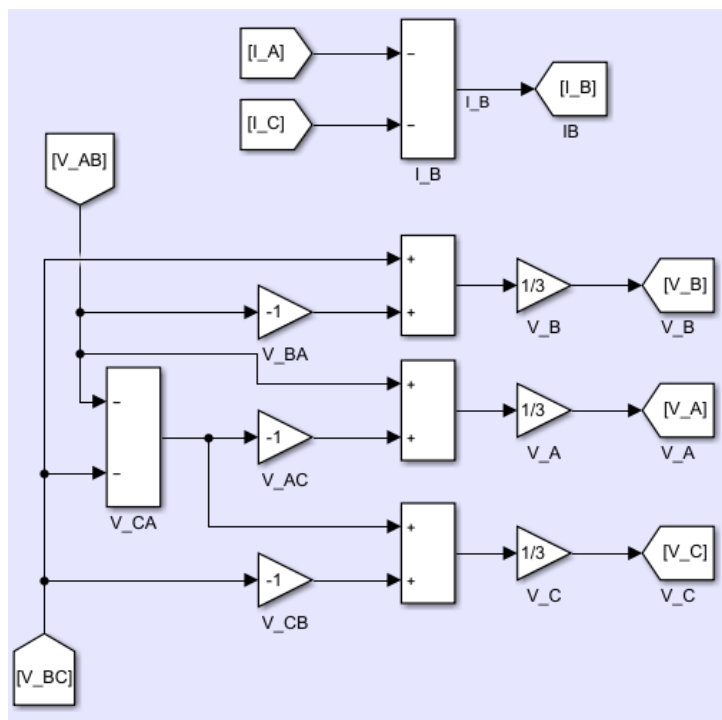
FIGURA 5. Grandezas elétricas sensoriadas em um sistema trifásico.



Fonte: próprio autor.

A partir desses parâmetros trifásicos faz-se uma conversão para tensões e correntes por fase, processo ilustrado na Figura 6.

FIGURA 6. Conversão dos valores de linha em valores de fase das grandezas elétricas sensorizadas.



Fonte: próprio autor.

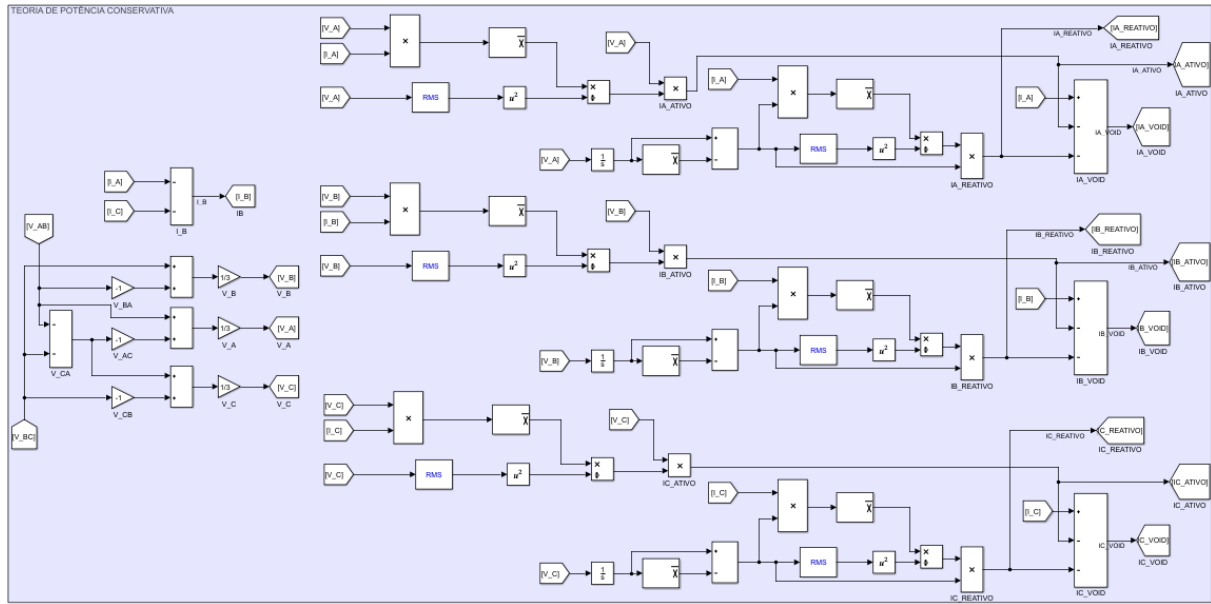
A partir dos valores por fase do sistema trifásico, os cálculos das correntes ativa, reativa e residual são calculadas para cada fase de acordo com os procedimentos das Figuras 2 e 3 para as parcelas ativa e reativa, respectivamente, e a Equação 2.21 define a parcela residual.

O processo completo é apresentado na Figura 7.

2.2.3 Fator de potência e qualidade de energia

A aplicação da CPT em sistemas de energia está diretamente ligada aos conceitos de fator de potência e qualidade de energia, [1]. Cargas não lineares se tornaram equipamentos cativos em plantas industriais - a exemplo de inversores e retificadores para acionamento de motores elétricos - a ventilação e refrigeração de ambientes comerciais, residenciais e também industriais representam uma parcela muito signifi-

FIGURA 7. Implementação da teoria de potência conservativa em um sistema trifásico.



Fonte: próprio autor.

cativa do consumo de energia elétrica, com o avanço das tecnologias para melhorar a eficiência de tais equipamentos e expandir suas aplicações - tomando como exemplo o controle de velocidade de MITs - tornou-se evidente a preocupação relativa à qualidade de energia e o fator de potência da instalação, ambos impactados pelo conteúdo harmônico inserido nos sistemas elétricos senoidais dada a não linearidade introduzida pelos processos de retificação.

Define-se fator de potência como a relação entre potência aparente e potência ativa. Recorre-se a desigualdade de Cauchy-Schwartz para dar embasamento matemático à definição de fator de potência, [10]:

$$|\langle \underline{u}, \underline{i} \rangle| \leq \|\underline{u}\| \cdot \|\underline{i}\| \quad (2.24)$$

A equação mostra que a potência ativa pode no máximo ser igual a potência aparente, ilustrando o máximo aproveitamento do sistema elétrico, cenário ideal porém impactado pelas parcelas reativo e residual de potência que torna o fator de potência menor, evidenciando um impacto operacional e econômico nos sistemas de energia, já que não são aproveitados em sua plenitude para o transporte de potência ativa, a única

capaz de gerar trabalho. Dessa forma define-se fator de potência de acordo com:

$$\lambda = \frac{P}{S} \leq 1 \quad (2.25)$$

Assim, dispor de uma ferramenta capaz de analisar adequadamente as componentes de potência de circuitos elétricos torna possível a compensação dos sistemas de forma a otimizar a operação das redes de energia. É nesse contexto que os FAPs se tornam equipamentos fundamentais para correção ativa e passiva de fator de potência, fornecendo de forma local as necessidades extra potência ativa de cargas não lineares, [2, 4, 8]. A otimização do uso das redes elétricas é algo tão importante que é previsto em legislação a imposição de multa, por parte das concessionárias de energia, para os consumidores que extrapolam os limites de fator de potência definidos, a fim de se ter o melhor uso possível das redes de eletricidade. Mostrando a importância de metodologias de correção do fator de potência das instalações, uma vez que para cumprir suas tarefas produtivas não podem abrir mão de nenhuma tecnologia que aprimorem sua atividade fim, mesmo que degradem os sistemas senoidais.

Vale ressaltar que a definição de fator de potência se aplica tanto a sistemas monofásicos e trifásicos, para se obter as respectivas quantidades totais de potência - ativa, reativa e residual - aplica-se as devidas análises de circuitos para cada caso.

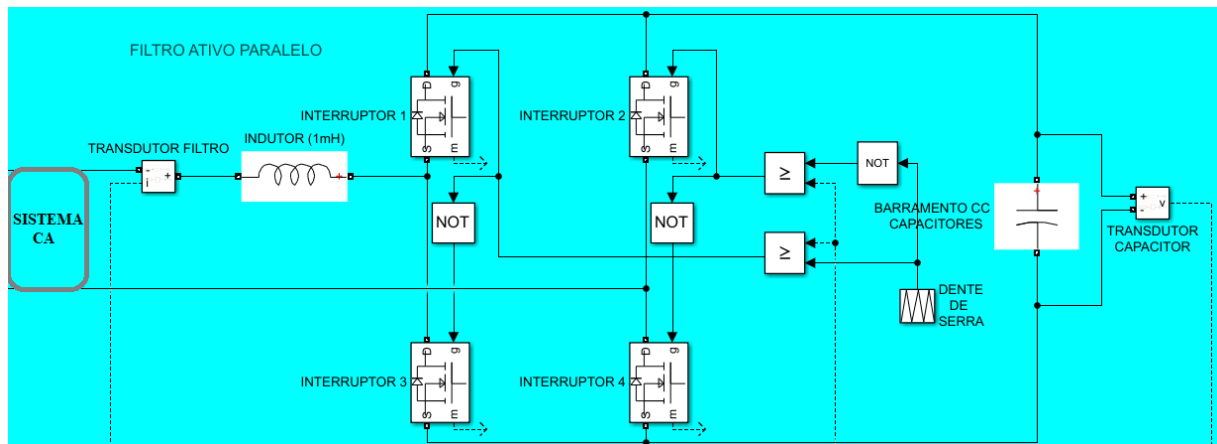
No ambiente de cargas não lineares o Filtro Ativo Paralelo se mostra a solução ideal, uma tecnologia eficiente em atuar na compensação de harmônicos de corrente, podendo ser responsável pela correção ativa do fator de potência atuando apenas na distorção harmônica da carga - ficando a cargo dos já conhecidos bancos de capacitores a correção passiva, ou seja, atuando apenas na parcela reativa de potência - ou atuar na correção total, situação abordada neste trabalho.

Capítulo 3

Metodologia de projeto dos filtros paralelos

Para tornar a aplicação da teoria explorada no capítulo anterior paupável, será utilizada uma topologia de inversor de tensão para cumprir o papel da fonte de corrente que irá processar as parcelas de potência reativa e residual do sistema CA ao qual estará inserida. A Figura 8 ilustra a configuração para o FAP monofásico, enquanto a Figura 9 traz o FAP trifásico.

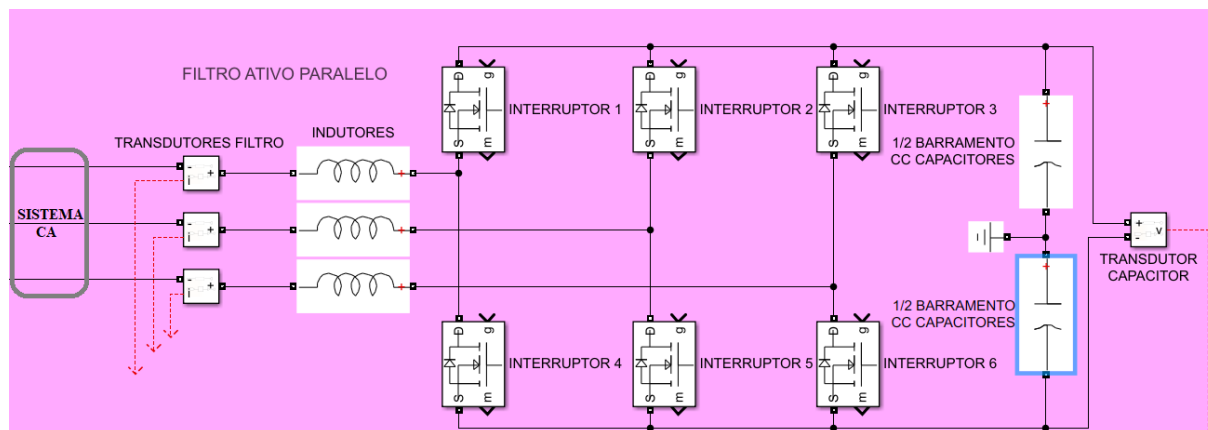
FIGURA 8. Topologia para o FAP monofásico.



Fonte: próprio autor.

Com o intuito de tornar o dispositivo passível de construção real, as seções subseqüentes abordam o dimensionamento dos elementos principais para as topologias apresentadas nas Figuras 8 e 9.

FIGURA 9. Topologia para o FAP trifásico.



Fonte: próprio autor.

3.1 Indutores

Para fazer o acoplamento do FAP com o sistema elétrico desejado faz uso de indutores de modo que o dispositivo atue como uma fonte de corrente para o conjunto rede/carga, possibilitando assim a injeção ou drenagem de potência reativa e/ou residual. Independentemente da topologia ser monofásica ou trifásica, a metodologia de projeto é exatamente a mesma, pois aborda apenas a confecção de cada parte integrante do elemento armazenador de energia. Os esforços de corrente utilizados para dimensionar os indutores foram extraídos do sistema simulado de acordo com a potência escolhida para operação.

O roteiro subsequente mostra como chegou-se em um indutor que atende as necessidades do filtro trifásico simulado. A Tabela 1 exibe os parâmetros preliminares para execução do projeto.

TABELA 1. Parâmetros para o projeto do indutor L_f do FAP 3ϕ .

Parâmetros	Valores
Indutância	1 mH
Corrente de pico	16 A
Corrente eficaz	7 A
Fator de utilização da janela	0,6
Máxima densidade de fluxo magnético	0,3 T
Máxima densidade de corrente no condutor	400 A/cm ²

1. Produto de áreas

$$A_e \cdot A_w = \frac{L \cdot I_p \cdot I_{ef}}{k_w \cdot B_{max} \cdot J_{max}} \cdot 10^4 = 15,556 \text{ cm}^4 \quad (3.1)$$

2. Número de espiras

$$N = \frac{L \cdot I_p}{B_{max} \cdot A_e} \cdot 10^4 = 126,4 \quad (3.2)$$

O valor de $A_e = 4,22$ foi retirado do modelo de núcleo MMT139EE5525 da Magmattec.

3. Entreferro

$$l_g = \frac{N^2 \cdot \mu_0 \cdot A_e}{L} \cdot 10^{-2} = 69 \text{ } \mu m \quad (3.3)$$

4. Condutor

$$S_c \geq \frac{I_{ef}}{J_{max}} = 0,0175 \text{ cm}^2 \quad (3.4)$$

Escolheu-se um AWG14 com seção de $0,020811 \text{ cm}^2$.

5. Efeito pelicular

$$d_{max} \leq \frac{15}{\sqrt{f_s}} = 0,0866 \text{ cm} \quad (3.5)$$

Escolheu-se um AWG20 com diâmetro de $0,081 \text{ cm}$.

6. N° de condutores em paralelo

$$N_p = \frac{S_c}{(\pi \cdot d_{AWG}^2)/4} = 4 \quad (3.6)$$

Dessa forma conclui-se o dimensionamento dos indutores do FAP 3ϕ . O resultado está exposto na Tabela 2.

TABELA 2. Características do indutor L_f do FAP 3ϕ .

Características	Materiais/Valores
Núcleo escolhido	Magmattec MMT139EE5525
Nº de espiras	127
Nº de condutores AWG 20 em paralelo	4

3.1.1 FAP Monofásico

Para o dimensionamento do indutor do FAP monofásico utilizou-se o mesmo roteiro abordado anteriormente, tomando como base os parâmetros iniciais da Tabela 3.

TABELA 3. Parâmetros para o projeto do indutor L_f do FAP 1ϕ .

Parâmetros	Valores
Indutância	1 mH
Corrente de pico	24 A
Corrente eficaz	10 A
Fator de utilização da janela	0,6
Máxima densidade de fluxo magnético	0,3 T
Máxima densidade de corrente no condutor	400 A/cm ²

O resultado obtido é exibido na Tabela 4.

TABELA 4. Características do indutor L_f do FAP 1ϕ .

Características	Materiais/Valores
Núcleo escolhido	Magmattec MMT139EE5525
Nº de espiras	127
Nº de condutores AWG 20 em paralelo	4

3.2 Capacitores

Para o barramento CC do FAP necessita-se de outro elemento armazenador de energia clássico da eletrônica de potência, o capacitor. Para manter o nível de tensão adequado para o inversor acompanhar as tensões de fase-neutro da rede é necessário

que o capacitor suporte no mínimo um valor superior a tensão de pico de uma fase. É prática comum que o valor de tensão do barramento CC seja no mínimo superior em 30% o valor de crista da tensão alternada, dessa forma para o sistema monofásico 127 V simulado um capacitor de valor comercial 250 V atende de forma segura os esforços de tensão aos quais o FAP é submetido. Esta relação de tensões da rede e do barramento CC é denominada índice de modulação, [6].

Assim, para topologia trifásica é necessário dobrar a tensão do barramento CC em relação ao sistema monofásico, devido ao princípio de chaveamento. O índice de modulação agora passa a ser a tensão de pico de uma fase do sistema pela metade da tensão do barramento CC, fazendo-se assim necessário utilizar-se dois conjuntos série de capacitores de 250 V.

Para chegar a capacitância - a definição do valor será abordado no capítulo seguinte - desejada faz uso do paralelismo dos capacitores, prática que também torna possível o barramento CC suportar os esforços de corrente do FAP de acordo com a potência que será processada.

O dispositivo selecionado foi o capacitor KEMET-AEROVOX ALS30A222KE250 250 V 2200 μ F.

3.3 Transdutores

Para sensoriar o sistema ao qual necessita-se fazer a compensação, de modo a fornecer as informações necessárias para o estudo do comportamento da potência drenada pela carga, assim aplicando a teoria alvo do trabalho é preciso do auxílio de transdutores de tensão e corrente CA. Para verificar e assegurar a estabilidade do FAP será necessário um transdutor de tensão CC. O papel de cada componente supracitado será melhor compreendido no capítulo seguinte, onde suas finalidades serão ilustradas relacionadas à estratégia de controle do filtro.

Optou-se pelo uso de sensores de efeito Hall devido a necessidade de captar formas de onda de corrente e tensão com múltiplos elevados da frequência fundamental. Para selecionar de forma precisa cada componente os esforços de corrente, conforme

a potência projetada para o FAP, e a tensão de operação do sistema, foram tomadas como base, de forma que os dispositivos operem adequadamente.

1. FAP Trifásico

A Tabela 5 exibe os dispositivos selecionados para o sensoramento para o FAP 3ϕ .

TABELA 5. Transdutores para o FAP 3ϕ .

Tipo / Qtde	Parâmetros	Transdutor	Característica
Corrente CA/4	$I_p = 16A$	LAH 25-NP	18 A
	$I_{ef} = 7A$		8 A
Tensão CA/2	$V_p = 311V$	LV 25-P	10 a 500 V
Tensão CC/1	$V_{cc} = 500V$		

Por mais que seja intuitivo pensar que para um sistema 3ϕ - a 3 fios - fossem necessários 1 sensor de corrente para cada fase, na verdade apenas dois são suficientes para supervisionar as correntes de linha drenada pela carga e outros 2 para fazer a mesma função na saída do FAP, economizando assim 2 sensores de corrente ao todo. Para as tensões de linha também serão utilizados apenas 2 sensores de tensão. As equações 3.7 e 3.8 mostram as manipulações matemáticas para que se possa obter a terceira corrente de linha a partir de duas previamente conhecidas e as tensões de fase a partir dos valores de linha.

$$I_b = -(I_a + I_c) \quad (3.7)$$

Sendo I_a e I_c sensoriadas.

$$\begin{cases} V_a = \frac{1}{3} \cdot (V_{ab} + V_{ac}) \\ V_b = \frac{1}{3} \cdot (V_{ba} + V_{bc}) \\ V_c = \frac{1}{3} \cdot (V_{cb} + V_{ca}) \end{cases} \quad (3.8)$$

Sendo V_{ab} e V_{bc} sensoriadas. Define-se V_{ca} também a partir das tensões de linha, conforme 3.9.

$$V_{ca} = -(V_{ab} + V_{bc}) \quad (3.9)$$

2. FAP Monofásico

Para compensação do sistema monofásico as relações de corrente e tensão discutidas anteriormente afim de reduzir o número de transdutores se fazem desnecessárias, sendo suficiente dois transdutores de corrente CA - 1 para a corrente drenada da carga e outro para a saída do FAP - e 1 transdutor de tensão CA, além do transdutor de tensão CC. A Tabela 6 mostra os dispositivos selecionados.

TABELA 6. Transdutores para o FAP 1 ϕ .

Tipo / Qtde	Parâmetros	Transdutor	Característica
Corrente CA/4	$I_p = 24A$	GO 10-SME/SP3	25 A
	$I_{ef} = 10A$		10 A
Tensão CA/2	$V_p = 180V$	LV 25-P	10 a 500 V
Tensão CC/1	$V_{cc} = 250V$		

3.4 Esforços de corrente e tensão dos interruptores

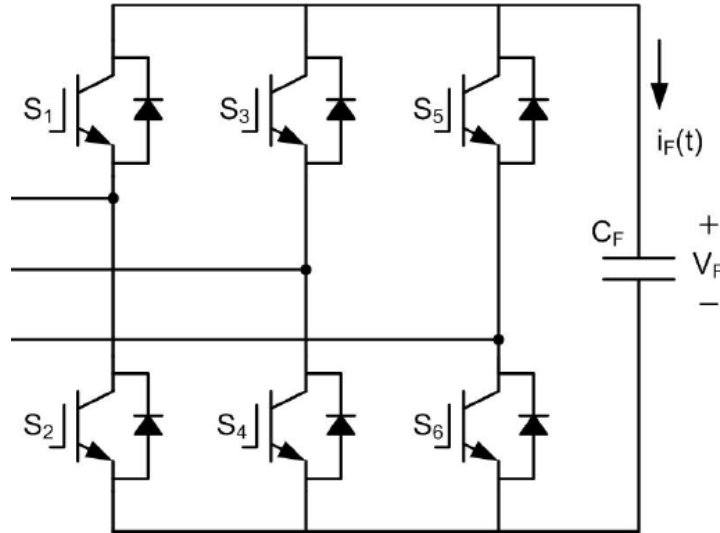
O FAP consiste basicamente de um inversor de frequência para converter a potência do barramento CC nos parâmetros da rede de corrente alternada. O chaveamento através de interruptores, a exemplo dos IGBT's, é quem possibilita essa conversão, por isso nesta seção serão abordados os limites de tensão e os esforços de corrente que esses dispositivos devem suportar em cada topologia - monofásica e trifásica.

1. FAP trifásico

Para esta topologia utiliza-se 6 interruptores, compondo 3 braços - 1 para cada fase. Aplicando a lei das tensões de Kirchhoff no circuito da Figura 10 conclui-se que a tensão a ser suportada pelo interruptor quando este está fechado é igual a tensão do barramento CC, a equação 3.10 exibe a aplicação da análise nodal na topologia. Já os esforços de corrente dos interruptores são aferidos de acordo com a solicitação da carga a ser compensada e os limites dos dispositivos especificados. Com auxílio da simulação obtém-se 7 amperes de corrente em regime permanente e 16 amperes de pico, ou seja, os interruptores escolhidos devem suportar os 3 parâmetros de tensão

e corrente supracitados. A escolha do interruptor necessário para aplicação é justificada na Tabela 7.

FIGURA 10. Topologia trifásica de um inversor de frequência.



Fonte: [8].

Para um dado instante do chaveamento os interruptores S1, S4 e S5 estão abertos, ou seja, não conduzem; enquanto seus respectivos pares estão conduzindo. Dessa forma aplicando a LTK no laço quem contempla os interruptores S5 e S6 junto da fonte V_F assumindo dispositivos ideais para análise chega-se ao resultado exposto em 3.10.

$$V_{Interrupor} = V_F = 500V \quad (3.10)$$

O dispositivo escolhido foi o SEMIKRON SEMITOP SK25GB12T4.

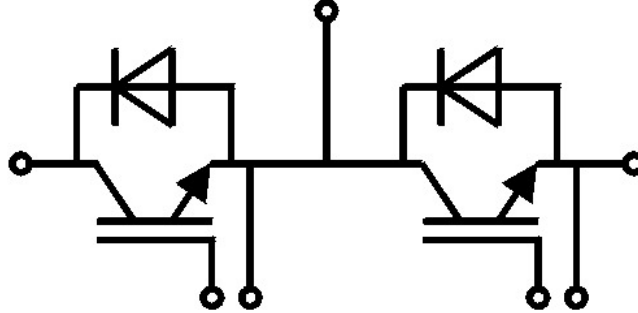
TABELA 7. IGBT para o FAP 3 ϕ .

Parâmetros	Simulação	IGBT
I_p	16 A	75 A
I_{ef}	7 A	25 A
V_p	500V	1200 V

São necessários 3 módulos do SEMIKRON SEMITOP SK25GB12T4. A Fi-

gura 11 ilustra a configuração do módulo.

FIGURA 11. SEMIKRON SEMITOP SK25GB12T4.

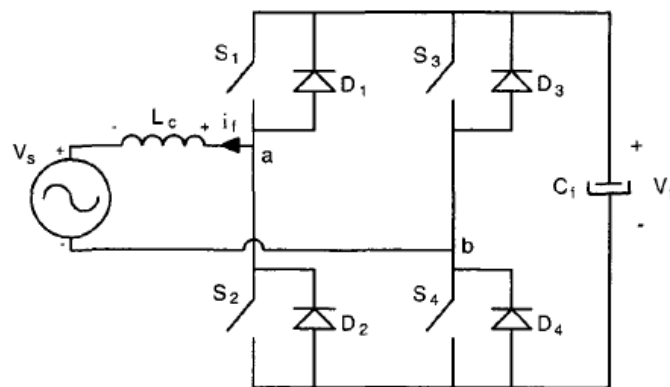


Fonte: fabricante.

2. FAP monofásico

A mesma abordagem é feita para esta topologia mais simples, a lei das tensões de Kirchhoff é aplicada ao circuito da Figura 12, cujo resultado é exibido na equação 3.11. Novamente recorre-se aos valores de corrente simulados para a carga específica a ser compensada. A escolha do interruptor necessário para aplicação é justificada na Tabela 8.

FIGURA 12. Topologia monofásica de um inversor de frequência.



Fonte: [1].

$$V_{Interruptor} = V_f = 250 \text{ V} \quad (3.11)$$

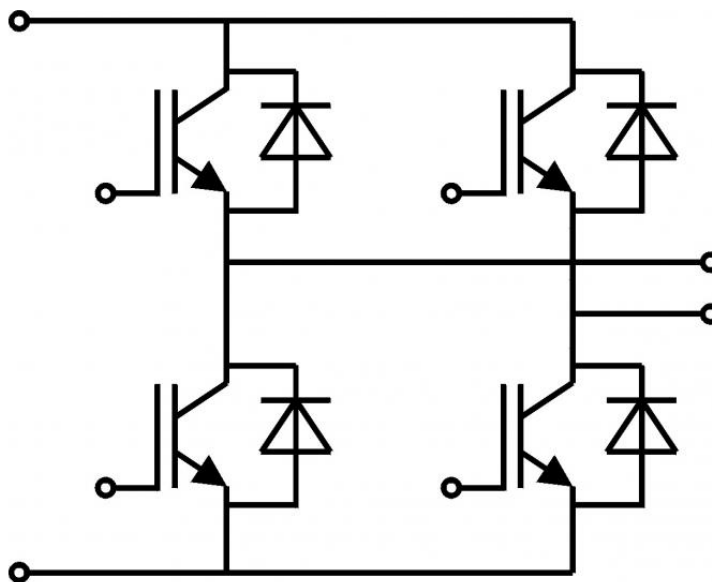
O dispositivo escolhido foi o SEMIKRON SEMITOP SK15GH066.

TABELA 8. IGBT para o FAP 1 ϕ .

Parâmetros	Simulação	IGBT
I_p	24 A	45 A
I_{ef}	10 A	15 A
V_p	250V	600 V

É necessário 1 módulo do SEMIKRON SEMITOPSK15GH066. A Figura 13 ilustra a configuração do módulo.

FIGURA 13. SEMIKRON SEMITOPSK15GH066.



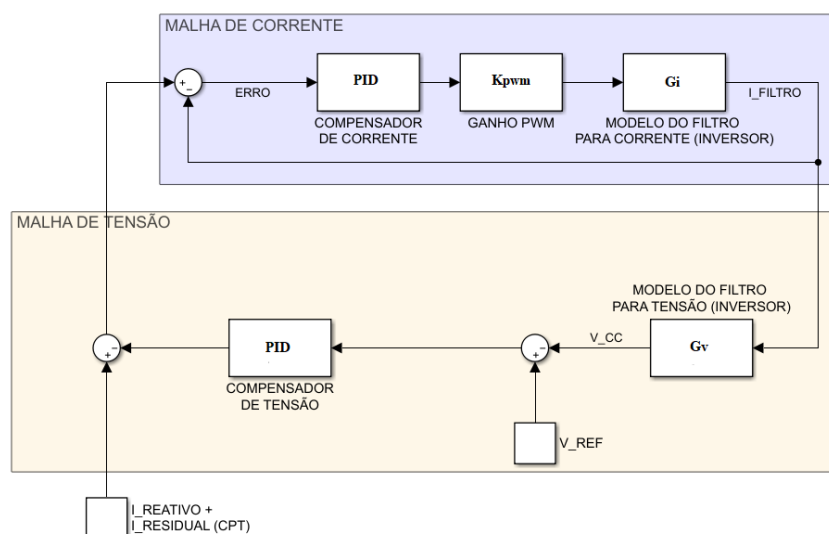
Fonte: fabricante.

Capítulo 4

Estratégia de controle e projeto dos controladores

Para extrair o desempenho desejado do filtro, de posse do modelo da planta, é preciso utilizar um compensador para ajustar as formas de onda da saída do inversor da forma desejada. A estratégia de controle explorada é fazer com que controladores PID, estudados em [7], atuem no chaveamento do filtro de forma que as correntes reativa e residual solicitadas pela carga não linear sejam as formas de onda presentes na saída do inversor, efetuando assim a compensação da carga em questão. A Figura 14 ilustra de forma genérica em diagrama de blocos a estratégia para os filtros monofásico e trifásico.

FIGURA 14. Estratégia de controle em diagrama de blocos.



Fonte: próprio autor.

Os modelos do FAP para corrente (G_i) e tensão (G_v) são apresentados nas equações 4.1 e 4.2

$$G_i = \frac{V_{CC}}{s \cdot L_f} \quad (4.1)$$

$$G_v = \frac{1 - D}{s \cdot C_f} \quad (4.2)$$

4.1 Malha de corrente

De maneira simples, a malha de corrente define o comportamento do conversor tendo como sinal de referência as parcelas de corrente oriundas dos cálculos referentes a implementação da teoria de potência conservativa. Para evitar distúrbios no controle oriundos da frequência de chaveamento escolhe-se um valor inferior observando garantir uma margem de segurança para que o comportamento linear do modelo possa ser implementado. Em 4.3 é apresentado o valor inicial da frequência de cruzamento da teoria de sistemas amostrado, utiliza-se o diagrama de bode para fazer o projeto do controlador.

$$f_{cruzamento} = \frac{f_s}{4} \quad (4.3)$$

As frequências para o zero e o pólo do controlador PID são definidos em 4.4 e 4.5.

$$f_{zero} = \frac{f_{cruzamento}}{2} \quad (4.4)$$

$$f_{polo} = f_s \quad (4.5)$$

De posse das posições do pólo e do zero do controlador, com auxílio do diagrama de Bode pode-se obter o ganho planta (K_{PID}) sabendo-se que na frequência de cruzamento o módulo da função de transferência do PID é 0 dB (ou ainda, igual a 1). As equações 4.6 e 4.7 exprimem a metodologia descrita.

$$FTMC = K_{PID} \cdot K_{PWM} \cdot |Gi(f_{cruzamento})| \cdot |PID(f_{cruzamento})| = 1 \quad (4.6)$$

$$K_{PID} = \frac{1}{K_{PWM} \cdot |Gi(f_{cruzamento})| \cdot |PID(f_{cruzamento})|} \quad (4.7)$$

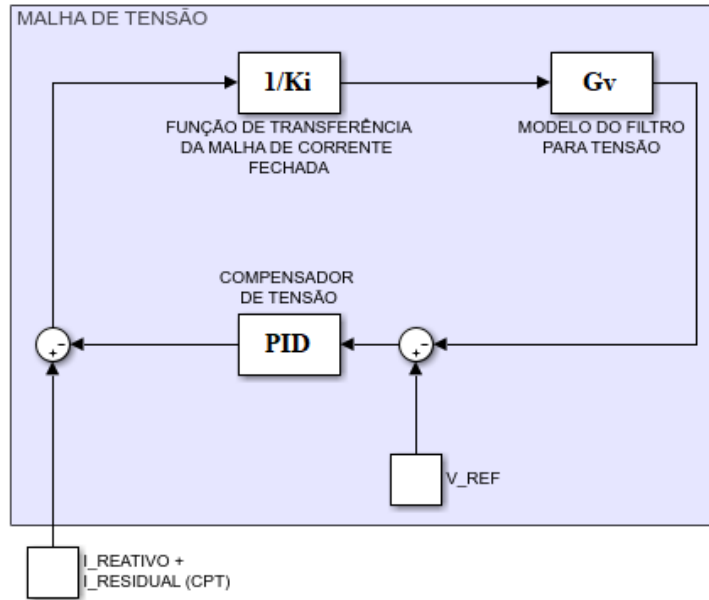
4.2 Malha de tensão

Já a malha de tensão tem a função de supervisionar o barramento CC mantendo-o com nível de tensão adequado para planta. Ou seja, é responsável por controlar o fluxo de potência ativa que flui pela FAP, com o intuito único de mantê-lo carregado já que o FAP só processa potência reativa e residual, assim espera-se que a malha de tensão atue na amplitude da forma de onda da corrente do filtro sem interferir na compensação. Para tanto utiliza-se uma frequência de cruzamento extremamente baixa e distante daquela escolhida para malha de corrente para garantir que não haja interferência causando assim alguma distorção indesejada na forma de onda a ser processada pelo FAP. A Figura 15 exibe em diagrama de blocos a estratégia de controle.

Define-se $f_{cruzamento}$ em 4 Hz e as frequências do zero e do pólo uma década abaixo e uma década acima, respectivamente, ou seja, f_{zero} em 0,4 Hz e f_{polo} em 40 Hz. Para definição do ganho do compensador PID procede-se da mesma maneira abordada na malha de corrente, as equações 4.8 e 4.9 expõem a abordagem para o cálculo em questão.

$$FTMT = \frac{K_{PID} \cdot |Gv(f_{cruzamento})| \cdot |PID(f_{cruzamento})|}{K_i} = 1 \quad (4.8)$$

FIGURA 15. Estratégia de controle em diagrama de blocos.



Fonte: próprio autor.

$$K_{PID} = \frac{K_i}{|Gv(f_{cruzamento})| \cdot |PID(f_{cruzamento})|} \quad (4.9)$$

Vale ressaltar que a malha de tensão inclui a função de transferência da malha de corrente fechada, porém em função da dinâmica tão mais rápida desta última ela pode ser modelada como o inverso do ganho ($1/K_i$) do amostrador de corrente, pois não interfere na dinâmica da malha de tensão.

As implementações específicas para os FAPs mono e trifásicos são apresentadas nas seções subsequentes.

4.3 FAP monofásico

Os primeiros valores de pólos, zeros e ganhos estáticos dos controladores se deu com base na metodologia apresentada até aqui, a fim de se obter a maior margem fase possível para que os ajustes feitos com auxílio do diagrama de Bode implementado no

MATLAB/Simulink[®] não alterassem significativamente a frequência de cruzamento para cada planta. As Tabelas 9 e 10 exibem o resultado final dos projetos dos controladores.

TABELA 9. Parâmetros para o controlador de corrente.

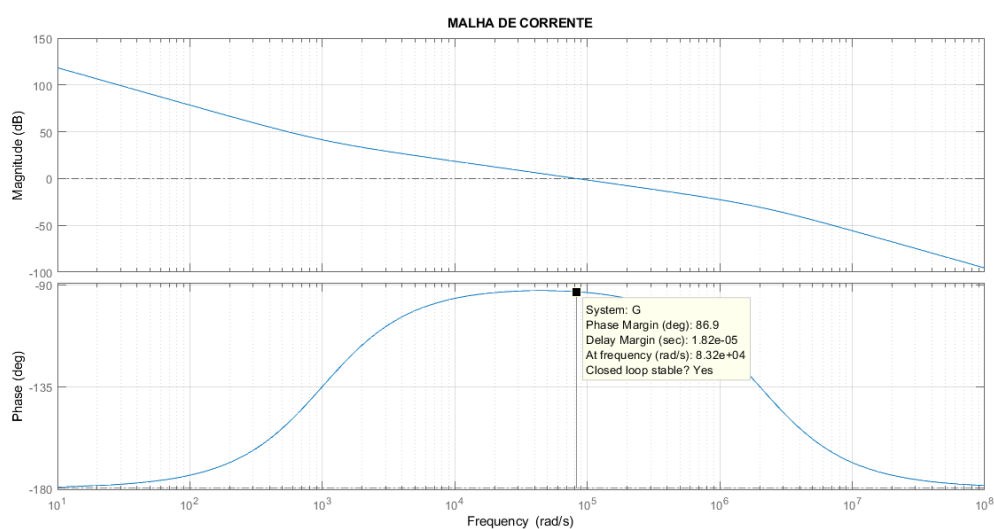
Parâmetros	Valores
$f_{cruzamento}$	83.2 krad/s
f_{polo}	2 Mrad/s
f_{zero}	1 krad/s
K_{PID}	10 M

TABELA 10. Parâmetros para o controlador de tensão.

Parâmetros	Valores
$f_{cruzamento}$	4.46 rad/s
f_{polo}	251 rad/s
f_{zero}	0.1 rad/s
K_{PID}	8

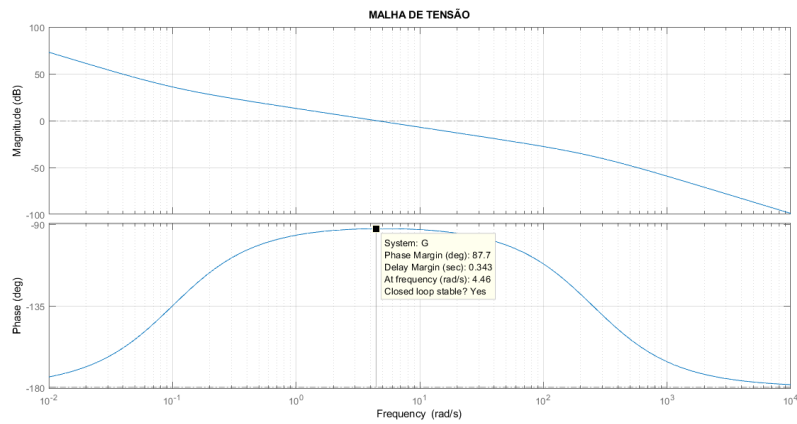
As Figuras 16 e 17 exibem o diagramas de Bode com a margem de fase obtida para as malhas de corrente e tensão, respectivamente.

FIGURA 16. Diagrama de Bode para malha de corrente do FAP.



Fonte: próprio autor.

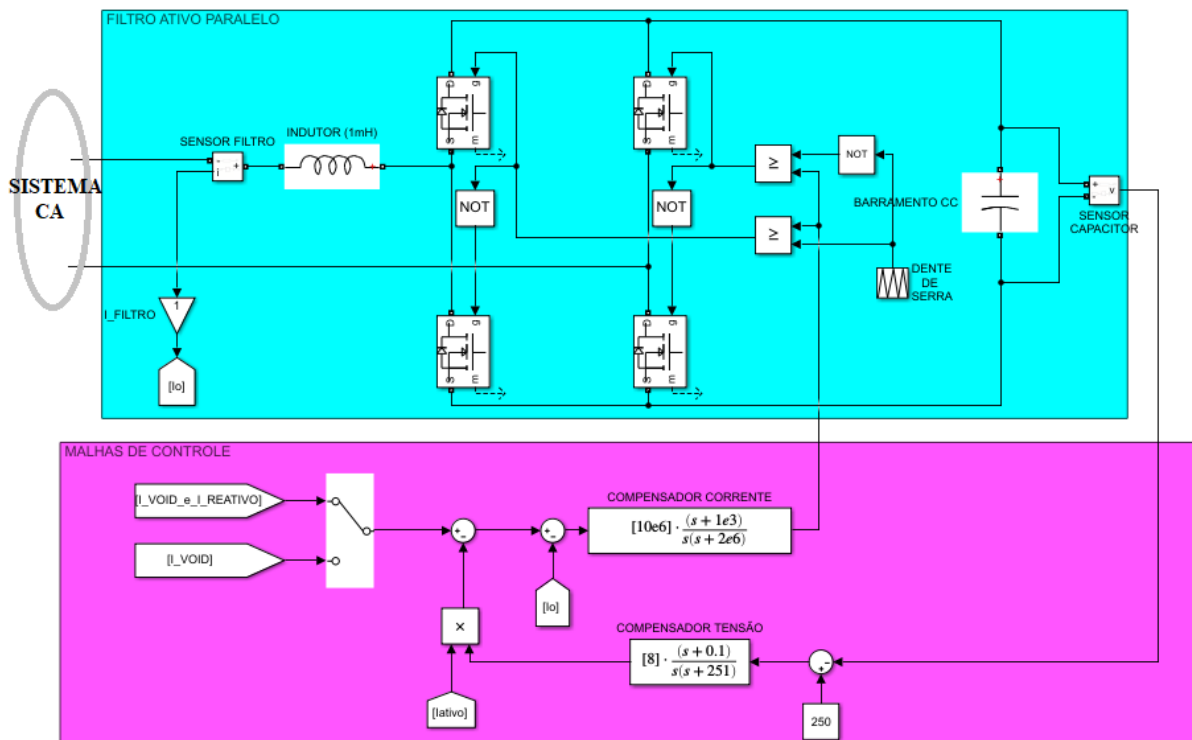
FIGURA 17. Diagrama de Bode para malha de tensão do FAP.



Fonte: próprio autor.

A implementação específica para o FAP monofásico é exposta na Figura 18 onde observa-se o sensoriamento da corrente e da tensão do filtro e as relações de entrada e saída de sinais dos controladores de tensão e corrente.

FIGURA 18. Estratégia de controle FAP monofásico.

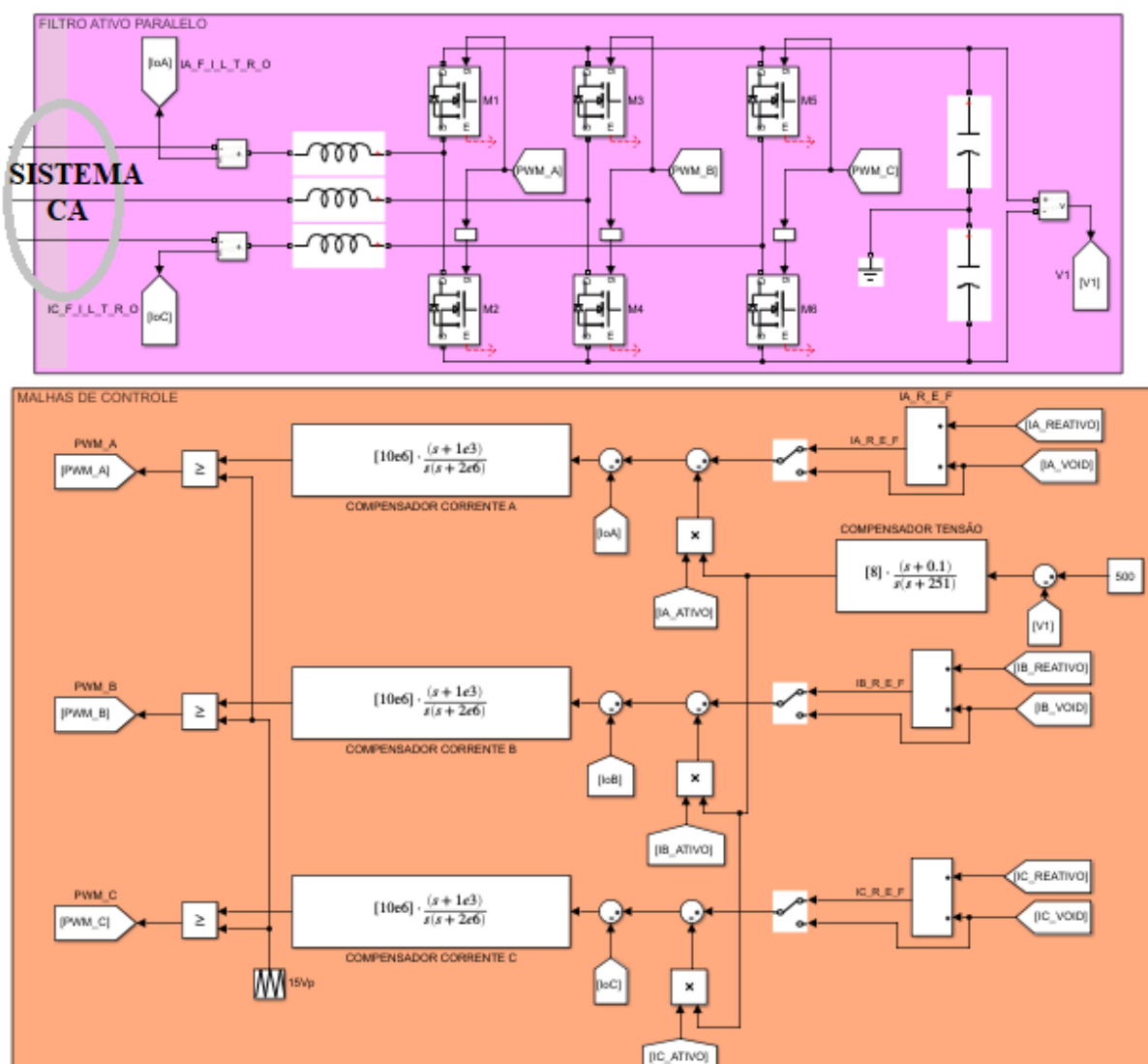


Fonte: próprio autor.

4.4 FAP trifásico

Para esta topologia os projetos dos controladores feitos para o caso monofásico são aproveitados pois os modelos apresentados em 4.1 e 4.2 não se alteram para o inversor de 3 braços com modulação a 2 níveis. A alteração feita aqui se apresenta no âmbito de controlar um inversor com 3 braços para o chaveamento, fazendo-se assim necessárias 3 malhas de corrente, mantendo ainda um única malha de tensão. A implementação específica para o FAP trifásico é apresentada na Figura 19.

FIGURA 19. Estratégia de controle FAP trifásico.



Fonte: próprio autor.

Por fim, vale ressaltar que o estudo do FAP trifásico aborda apenas circuitos equilibrados/balanceados. De forma resumida a carga trifásica compensada foi traduzida em parâmetros monofásicos de modo a aproveitar o trabalho feito anteriormente com os controladores, utilizando assim uma topologia de inversor conveniente para tanto.

Capítulo 5

Resultados de simulação e análise de casos

Finalmente, neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através de simulação para o estudo dos sistemas mono e trifásicos com aplicação da teoria de potência conservativa. Para tanto serão exibidas as configurações de cada sistema - fonte, cargas, ligação com o FAP - e para análise final as formas de onda de corrente para que se observe a contribuição do filtro para compensação da carga.

Serão analisados 3 casos específicos para compensação dos sistemas CA mono e trifásicos:

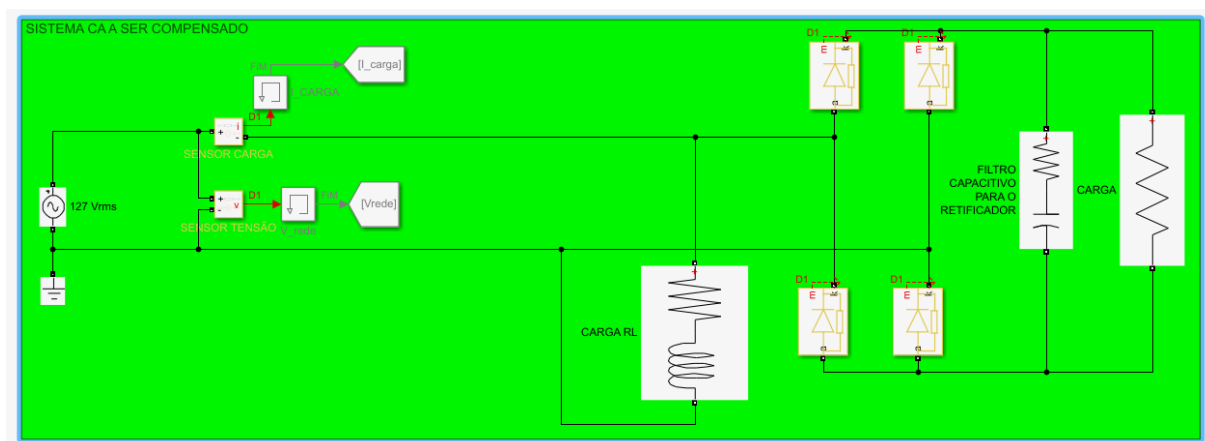
1. FAP compensando as potências reativa e residual;
2. FAP compensando apenas a potência residual - reativo da carga RL sem correção;
3. FAP compensando apenas a potência void e um banco de capacitores compensando o reativo da carga RL.

5.1 FAP monofásico

Inicia-se a análise da compensação do circuito fonte/carga monofásico apresentando na Figura 20 a configuração do sistema CA. Constituem o sistema a ser compensado uma fonte alternada em 60 Hz de 127 V eficaz, uma carga RL e um retificador de

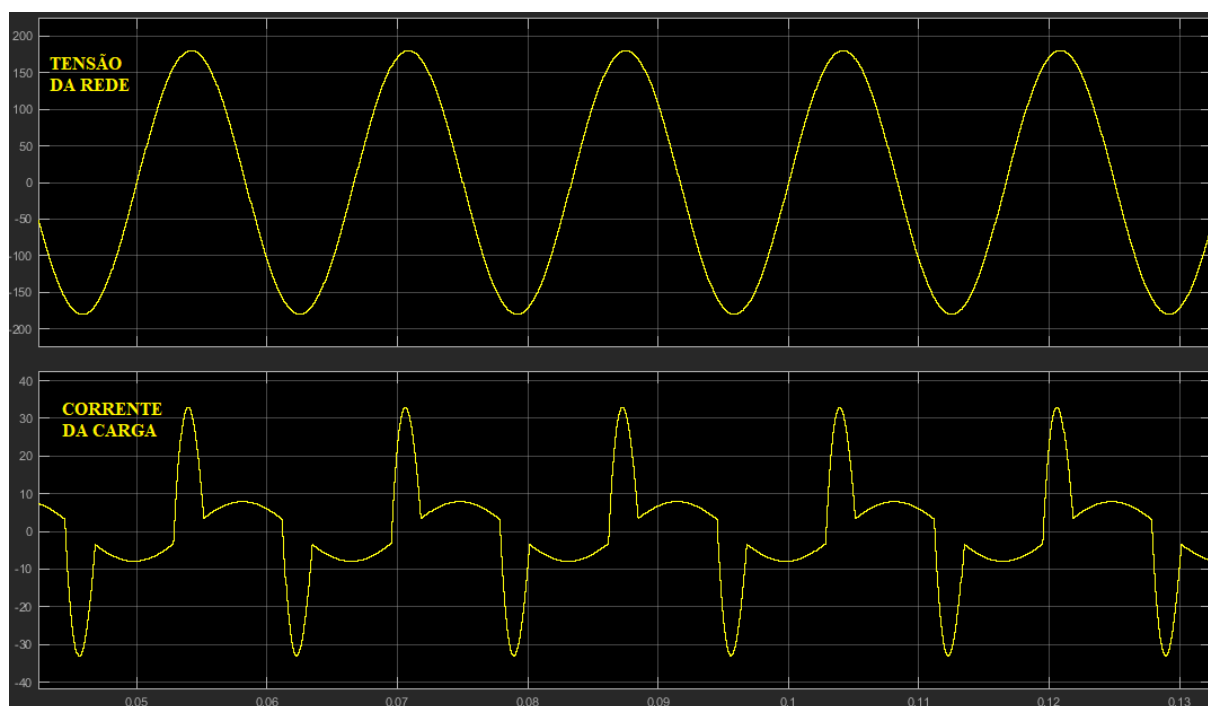
onda completa. As formas de onda da tensão e da corrente de carga são apresentadas na Figura 21.

FIGURA 20. Sistema CA - Fonte e Carga.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 21. Formas de onda da tensão e da corrente do sistema da Figura 20.



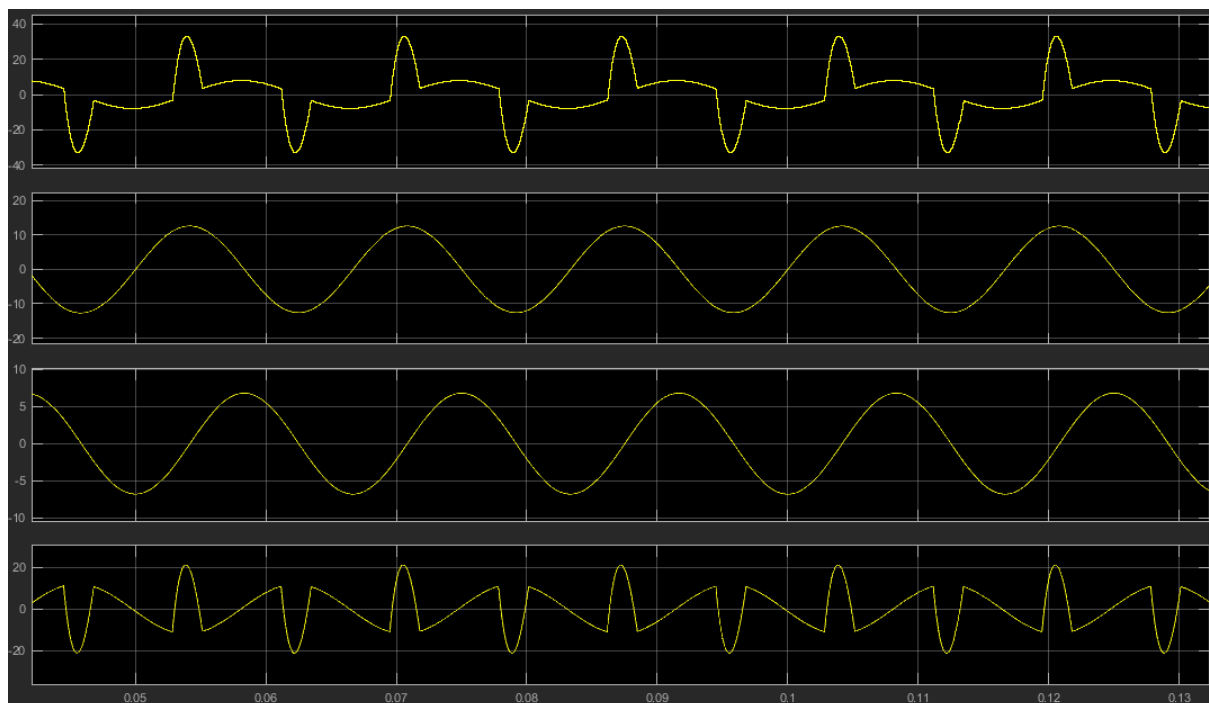
Fonte: próprio autor.

É nítido na forma de onda da corrente de carga da Figura 21 os picos exacer-

bados oriundos do carregamento abrupto do filtro capacitivo do retificador, essa característica de retificadores retira o aspecto senoidal da corrente do sistema CA, ou seja, introduz harmônicos no sistema projetado para trabalhar apenas com a frequência fundamental. Dessa forma, parâmetros, a exemplo do fator de potência e da qualidade de energia, são afetados trazendo prejuízos para o sistema, uma vez que deixa-se de transmitir em sua totalidade potência ativa pela rede e também pode causar mal funcionamento de outros equipamentos submetidos ao sistema poluído.

A Figura 22 traz o início da solução do problema, ou seja, é necessário usar a implementação da teoria vista no Capítulo 2 - tendo a Figura 4 como referência - para analisar as parcelas de corrente que constituem a forma de onda da corrente de carga da Figura 21. Após a aplicação da teoria de potência conservativa é possível separar as parcelas - correntes reativa e void - que causam problemas à rede elétrica. Assim é possível utilizá-las como referência para o sistema de controle abordado no Capítulo 4.

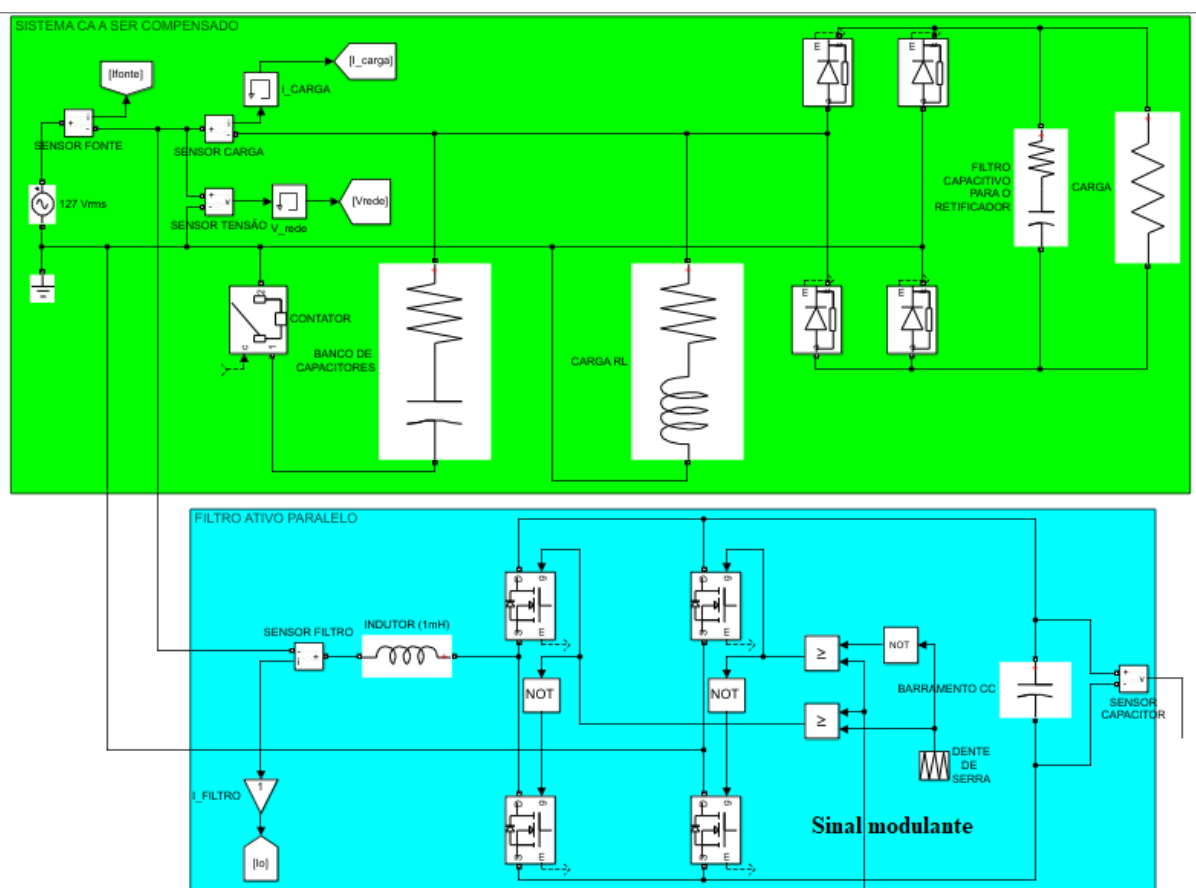
FIGURA 22. Formas de onda das correntes de carga, ativa, reativa e residual, respectivamente, do sistema da Figura 20.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 23 observa-se a inserção do FAP e de um banco de capacitores no sistema da Figura 20. Com esta configuração é possível fazer a compensação das correntes reativa e residual pela atuação do FAP ou ainda o banco de capacitores se encarregar da corrente reativa deixando apenas a parcela residual para o FAP. Vale ressaltar que o filtro é comandado pelo sistema de controle da Figura 18 do Capítulo 4.

FIGURA 23. Sistema CA com FAP.



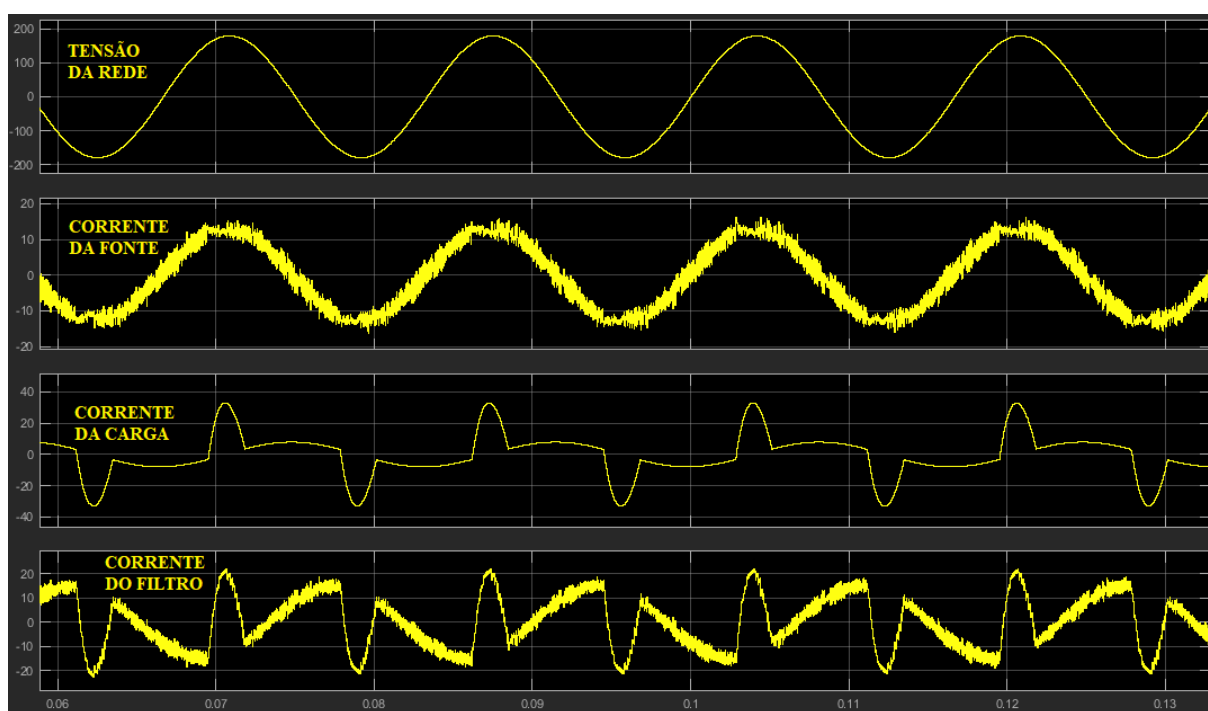
Fonte: próprio autor.

Com a atuação do FAP e dos capacitores é possível corrigir a corrente de carga observada na Figura 21, que pelo fato de ser suprida apenas pela fonte CA também é a corrente da fonte. Nas 3 análises de casos a seguir sempre será exibida a tensão da rede, a corrente da fonte, a corrente da carga e a corrente do filtro. As correntes da fonte e da carga agora se diferenciam pela inserção do FAP no sistema introduzindo um nó no acoplamento da fonte de tensão com o FAP.

1. FAP compensando as potências reativa e residual.

Na Figura 24 é notável que a corrente da fonte volta a ter um comportamento senoidal, não estando mais distorcida pelos picos de carregamento do filtro capacitivo do retificador, quem passa a assumir essa forma de onda é o FAP, que também supri a parcela de reativo da carga RL - evitando assim o defasamento angular entre corrente e tensão da fonte. Para isso na Figura 18 do Capítulo 4 a chave seletora que define a referência da malha de controle está fechada na soma das formas de onda das parcelas reativa e void de corrente, fazendo com que o FAP processe essas formas de onda em sua saída de potência. Vale ressaltar que o contator do banco de capacitores da Figura 23 está aberto.

FIGURA 24. Formas de onda do sistema CA sendo compensado (reativo e residual) pelo FAP.



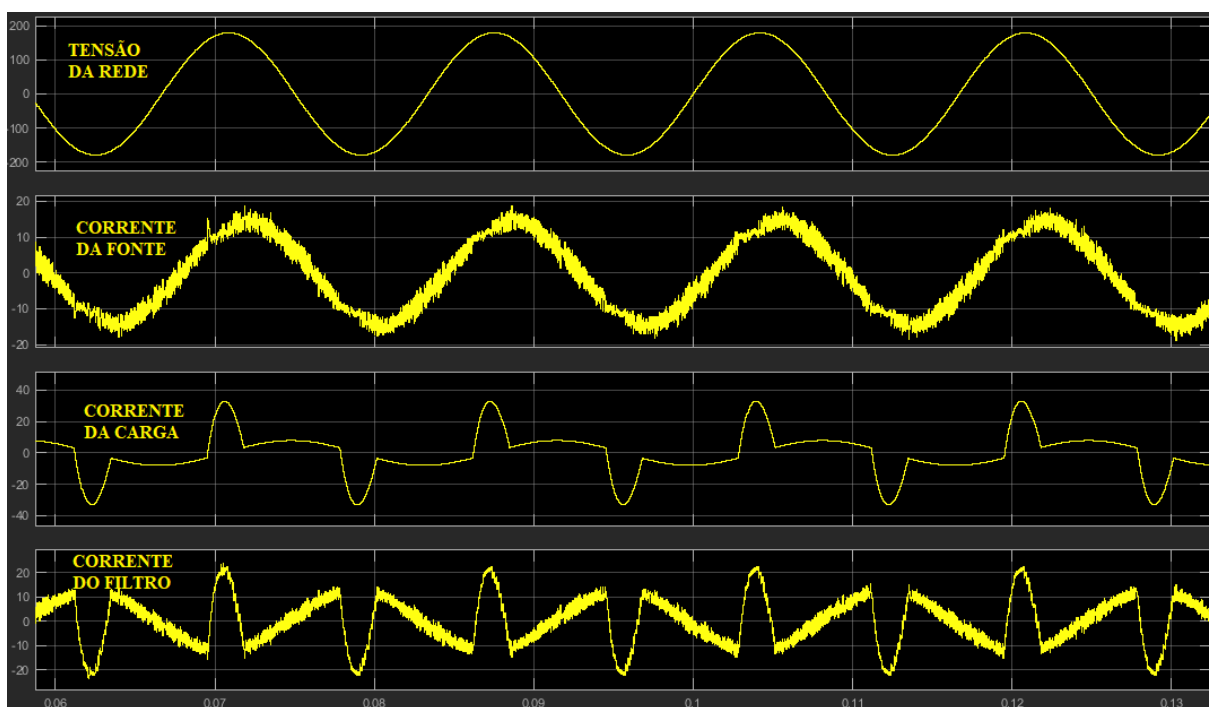
Fonte: próprio autor.

2. FAP compensando apenas a potência residual - reativo da carga RL sem correção.

Na Figura 25 é notável que a corrente da fonte volta a ter um comportamento senoidal, não estando mais distorcida pelos picos de carregamento

do filtro capacitivo do retificador, quem passa a assumir essa forma de onda é o FAP, que agora não supri a parcela de reativo da carga RL - evidenciando assim o defasamento angular entre corrente e tensão da fonte. Para isso na Figura 18 do Capítulo 4 a chave seletora que define a referência da malha de controle está fechada na forma de onda da parcela residual de corrente, fazendo com que o FAP processe apenas essa forma de onda em sua saída de potência. Vale ressaltar que o contator do banco de capacitores da Figura 23 está aberto.

FIGURA 25. Formas de onda do sistema CA sendo compensado (apenas residual) pelo FAP.



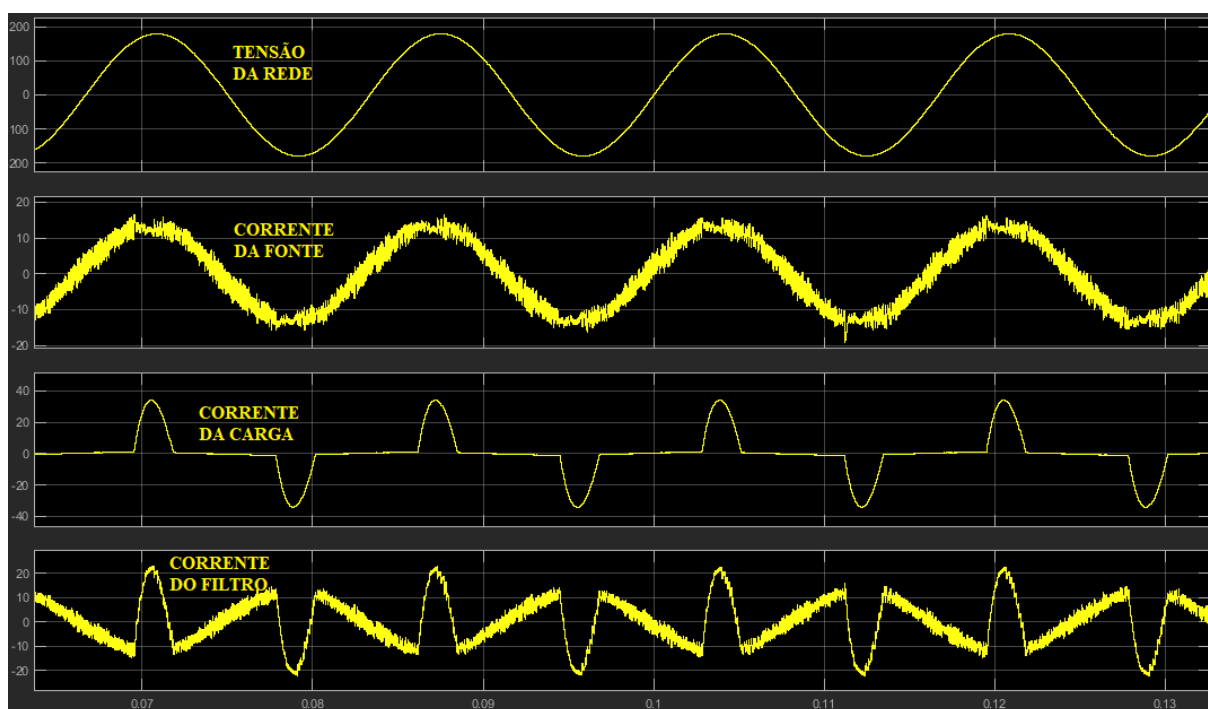
Fonte: próprio autor.

3. FAP compensando apenas a potência residual e um banco de capacitores compensando o reativo da carga RL.

Na Figura 26 é notável que a corrente da fonte volta a ter um comportamento senoidal, não estando mais distorcida pelos picos de carregamento do filtro capacitivo do retificador, quem passa a assumir essa forma de onda é o FAP, que supri apenas a parcela residual de corrente, sendo responsa-

bilidade do banco de capacitores a compensação do reativo da carga RL. Para isso na Figura 18 do Capítulo 4 a chave seletora que define a referência da malha de controle está fechada na forma de onda da parcela residual de corrente, fazendo com que o FAP processe apenas essa forma de onda em sua saída de potência, junto disso na Figura 23 o contator do banco de capacitores é fechado.

FIGURA 26. Formas de onda do sistema CA tendo a parcela residual de corrente compensada pelo FAP e a parcela reativa pelo banco de capacitores.



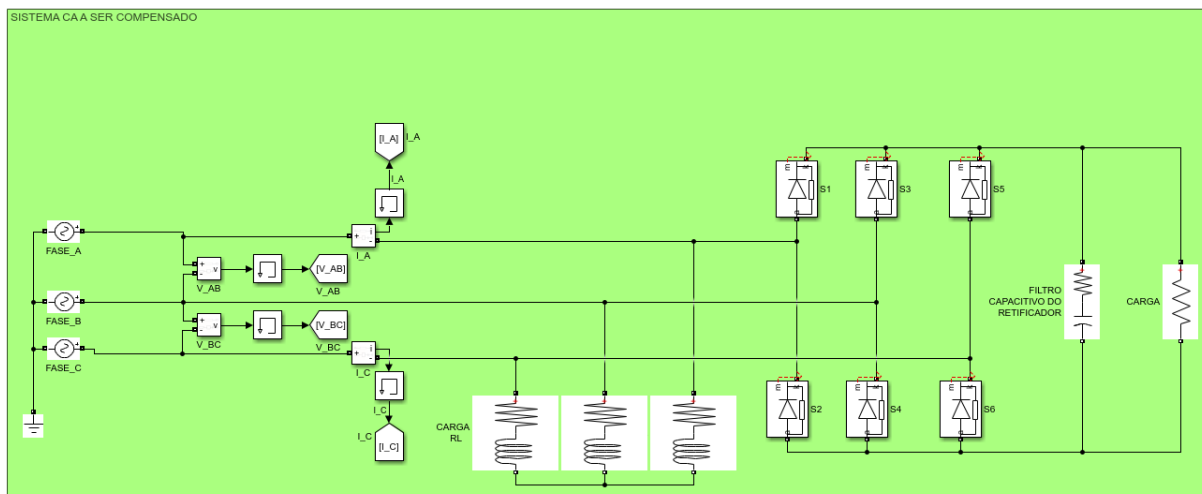
Fonte: próprio autor.

5.2 FAP trifásico

Inicia-se a análise da compensação do circuito fonte/carga trifásico apresentando na Figura 27 a configuração do sistema CA. Constituem o sistema a ser compensado 3 fontes alternadas em 60 Hz de 127 V eficazes ligadas em estrela, uma carga RL - também ligada em estrela - e um retificador com configuração ponte de Graetz. As formas de onda da tensão e da corrente de linha - Fase A - são apresentadas na Figura

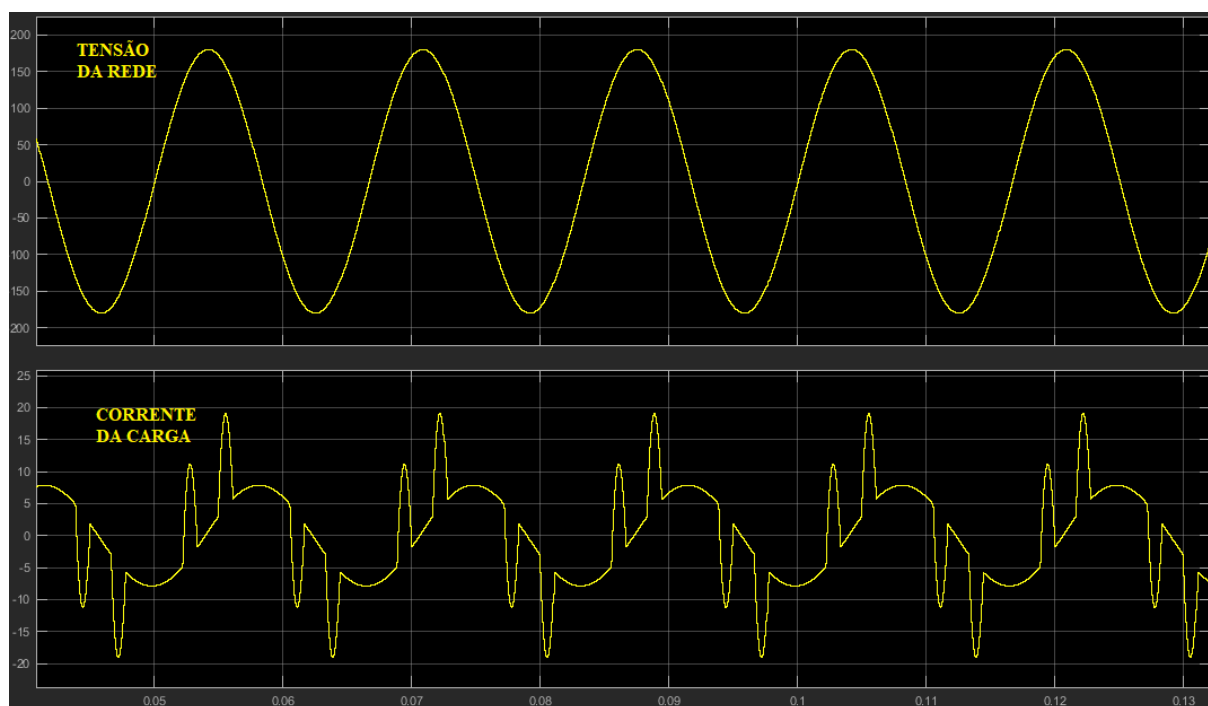
28.

FIGURA 27. Sistema CA - Fonte e Carga.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 28. Formas de onda da tensão e da corrente - fase A - do sistema da Figura 27.

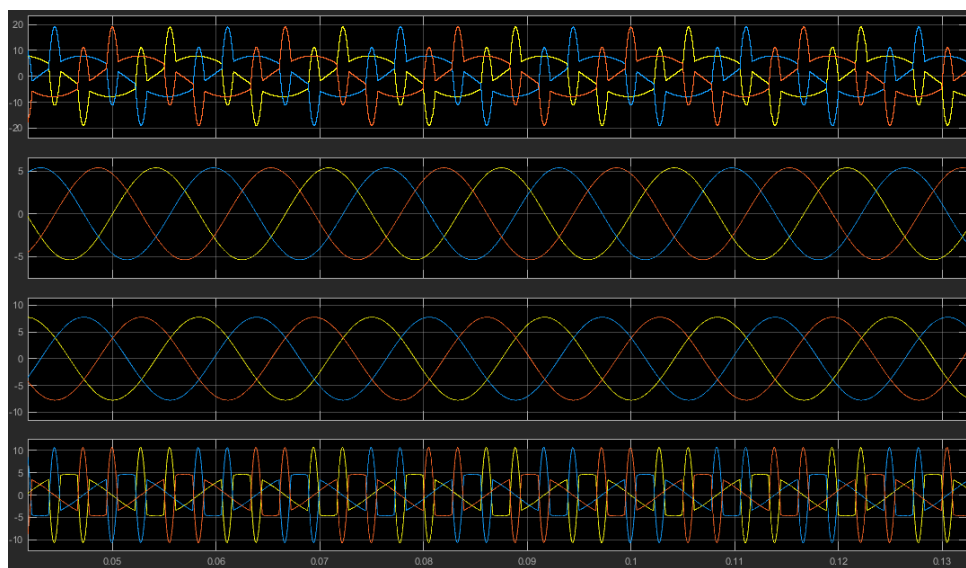


Fonte: próprio autor.

Observa-se, a exemplo do caso monofásico, as distorções na forma de onda da corrente de carga da Figura 28, os picos exacerbados oriundos do carregamento abrupto do filtro capacitivo do retificador agora aparecem em maior quantidade devido ao chaveamento característico do retificador trifásico utilizado. As mesmas considerações feitas no caso anterior sobre fator de potência e qualidade de energia são verdades para o caso trifásico também.

A Figura 29 traz o início da solução do problema, ou seja, é necessário usar a implementação da teoria vista no Capítulo 2 - tendo a Figura 7 como referência - para analisar as parcelas de corrente que constituem a forma de onda da corrente de carga da Figura 28. Após a aplicação da teoria de potência conservativa é possível separar as parcelas - correntes reativa e residual - que causam problemas à rede. Assim é possível utilizá-las como referência para o sistema de controle abordado no Capítulo 4.

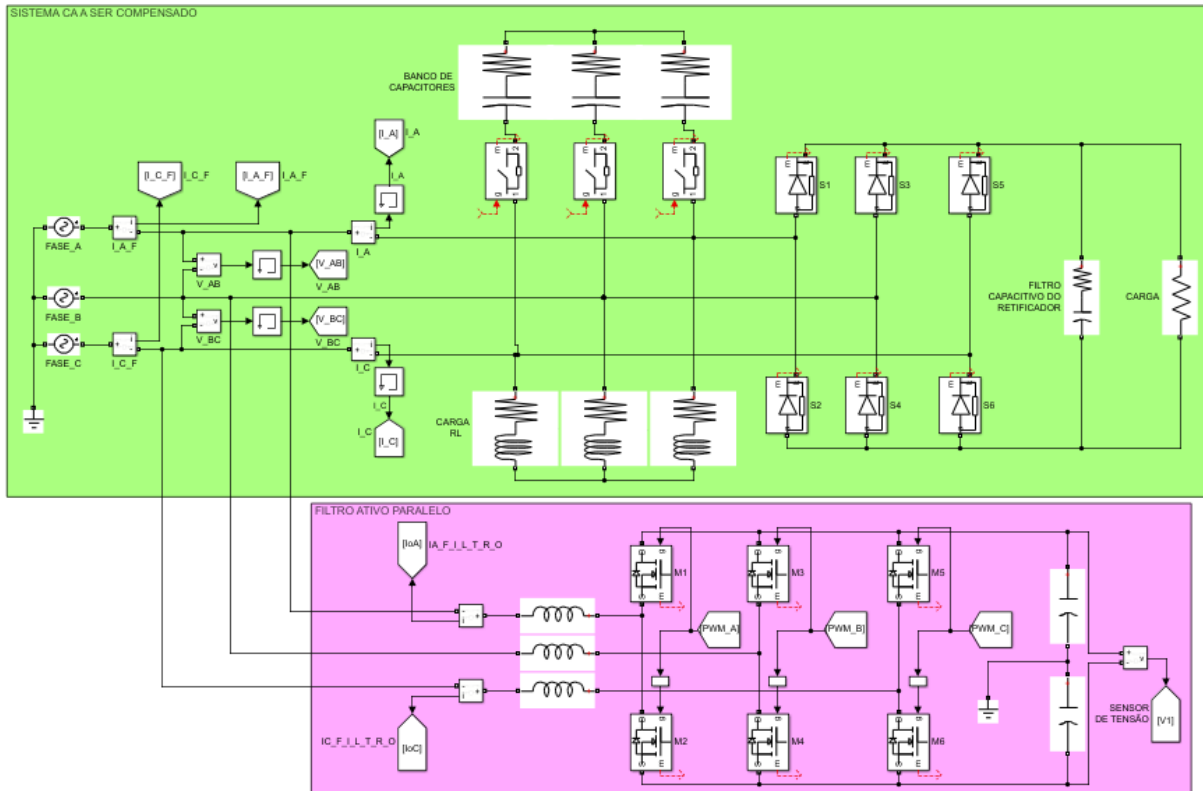
FIGURA 29. Formas de onda das correntes de carga, ativa, reativa e residual do sistema trifásico da Figura 27.



Fonte: próprio autor.

Na Figura 30 observa-se a inserção do FAP e de um banco de capacitores no sistema da Figura 27. Com esta configuração é possível fazer a compensação das correntes reativa e residual pela atuação do FAP ou ainda o banco de capacitores se encarregar da corrente reativa deixando apenas a parcela residual para o FAP. Vale ressaltar que o filtro é comandado pelo sistema de controle da Figura 19 do Capítulo 4.

FIGURA 30. Sistema CA com FAP.



Fonte: próprio autor.

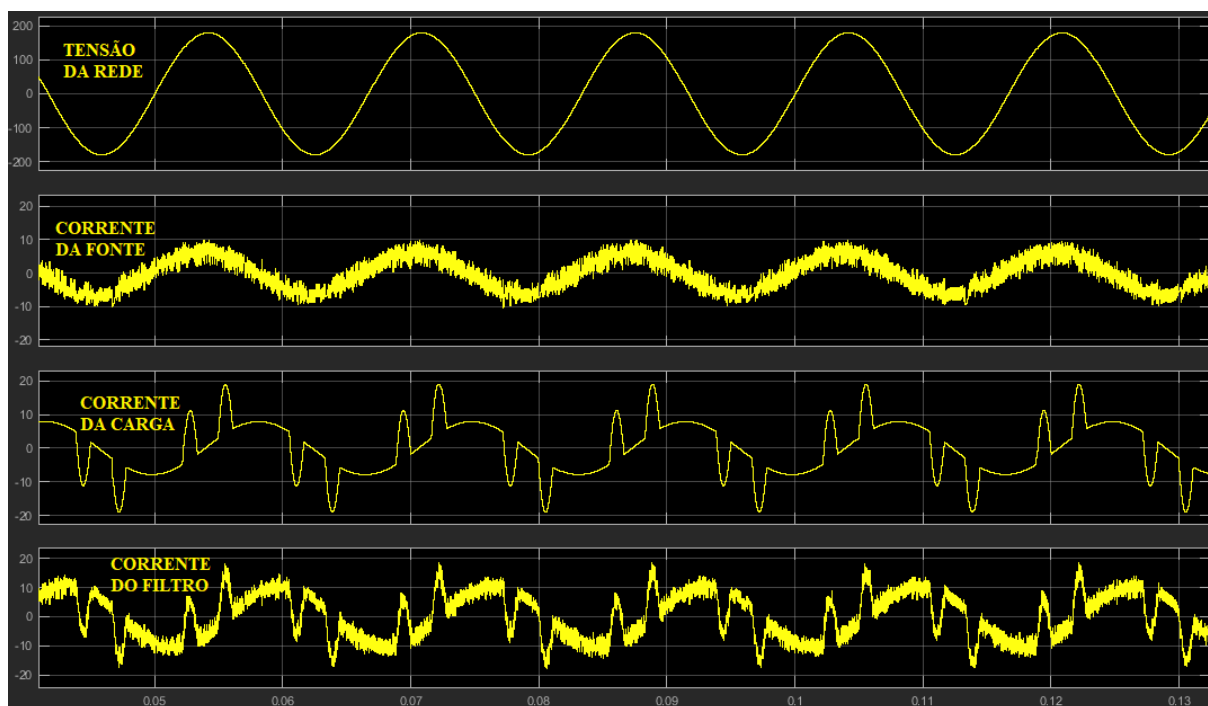
Com a atuação do FAP e dos capacitores é possível corrigir a corrente de carga observada na Figura 28, que pelo fato de ser suprida apenas pela fonte CA também é a corrente da fonte. Nas três análises de casos a seguir sempre será exibida a tensão da rede, a corrente da fonte, a corrente da carga e a corrente do filtro. As correntes da fonte e da carga agora se diferenciam pela inserção do FAP no sistema, introduzindo um nó no acoplamento da fonte de tensão com o FAP.

1. FAP compensando as potências reativa e residual.

Observando a Figura 31 obtém-se as mesmas conclusões expostas para a topologia monofásica, ou seja, a corrente da fonte volta a ter um comportamento senoidal. Para isso as condições operacionais nas Figuras 19 do Capítulo 4 e 30 se mantêm as mesmas para a análise monofásica análoga.

2. FAP compensando apenas a potência residual - reativo da carga RL sem correção.

FIGURA 31. Formas de onda - fase A - do sistema CA sendo compensado (reativo e residual) pelo FAP.



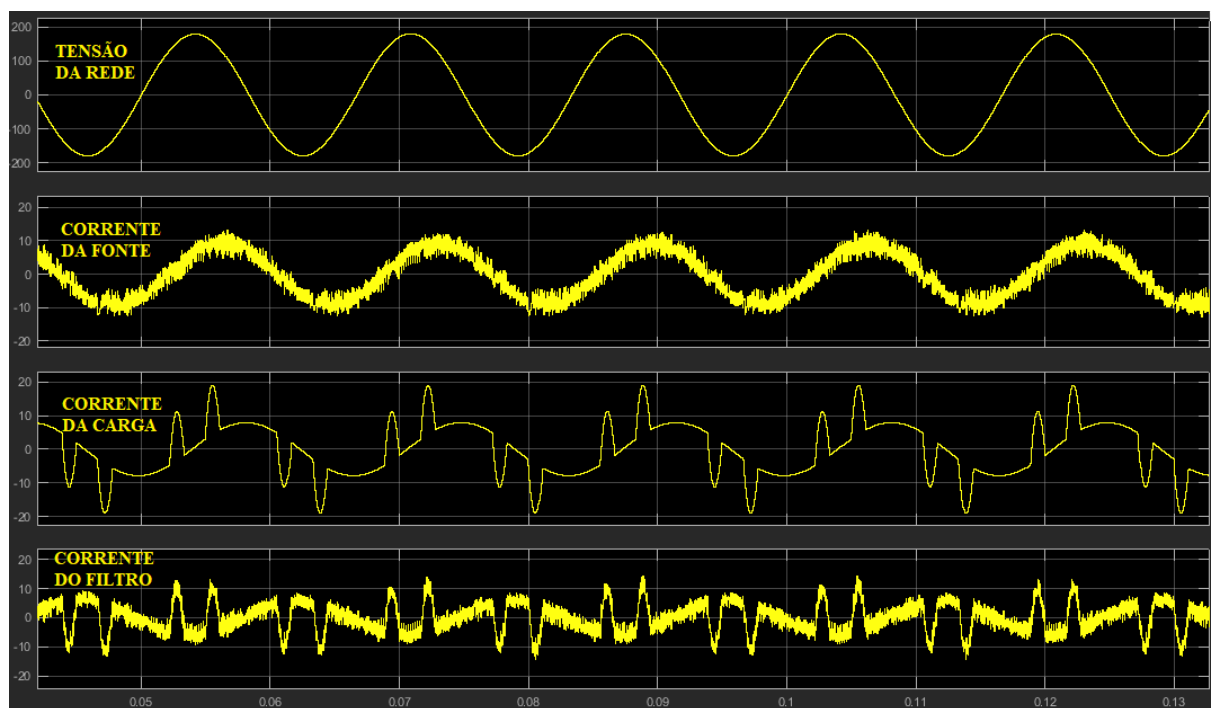
Fonte: próprio autor.

Mais uma vez o sucesso obtido na análise monofásica se repete para a abordagem trifásica, na Figura 32 visualiza-se o comportamento senoidal. O FAP não supri a parcela de reativo da carga RL - evidenciando assim o defasamento angular entre corrente e tensão da fonte. Para isso, as condições operacionais nas Figuras 19 do Capítulo 4 e 30 se mantêm as mesmas para a análise monofásica análoga .

3. FAP compensando apenas a potência residual e um banco de capacitores compensando o reativo da carga RL.

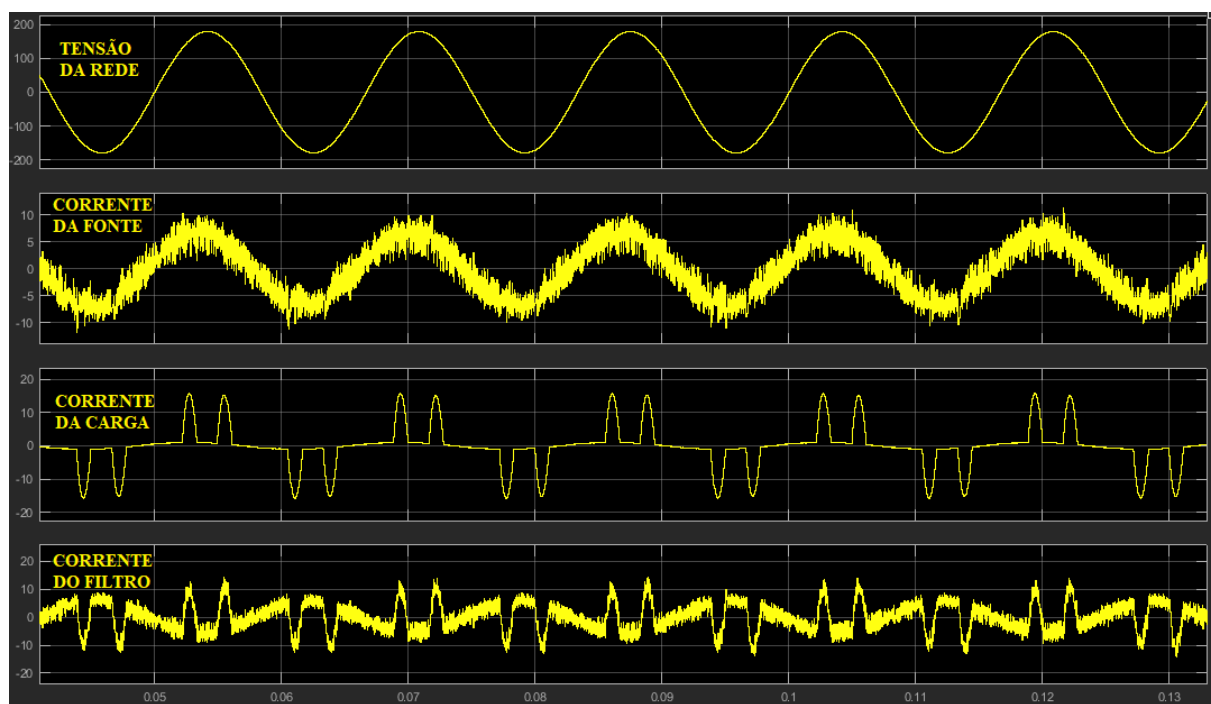
Na última abordagem, envolvendo agora FAP e capacitores, na Figura 33 mais uma vez a corrente da fonte volta a ter um comportamento senoidal desejado, o FAP assumi a forma de onda da corrente residual, enquanto o banco de capacitores faz compensação do reativo da carga RL. Para isso as condições operacionais das Figuras 19 do Capítulo 4 e 30 se mantêm as mesmas para a análise monofásica análoga.

FIGURA 32. Formas de onda - fase A - sistema CA sendo compensado (apenas residual) pelo FAP.



Fonte: próprio autor.

FIGURA 33. Formas de onda - fase A - do sistema CA tendo a parcela residual de corrente compensada pelo FAP e a parcela reativa pelo banco de capacitores.



Fonte: próprio autor.

As três análises de caso feitas, para as topologias mono e trifásicas, mostram a flexibilidade da aplicação da teoria conservativa de potência aplicada a filtros ativos, pois é possível distinguir as parcelas reativa e residual de corrente. Dessa maneira é possível escolher a técnica mais adequada para a correção ativa e passiva do fator de potência, otimizando assim os recursos e técnicas disponíveis para tal atividade.

Pelo fato do FAP utilizar semicondutores de potência, capacitores, indutores e sensores, evitar a circulação de valores de corrente desnecessários pode otimizar o dimensionamento dos dispositivos que compõem o filtro, uma vez que para a correção de reativo oriundo de cargas indutivas é usual a aplicação de bancos de capacitores. Aplicar a tecnologia muito superior do FAP para tal tarefa se mostra uma tática nada inteligente do ponto de vista da real necessidade para atacar o problema.

Capítulo 6

Conclusão e trabalhos futuros

Foi proposto e analisado neste trabalho o projeto e desenvolvimento de uma solução para o problema de qualidade de energia, inerente a presença de harmônicos no sistema elétrico. Tendo como objetivo principal simular e modelar um FAP para correção de harmônicos de corrente, utilizando a Teoria de Potência Conservativa, o desenvolvimento do trabalho no ambiente MATLAB/Simulink[®] proporcionou clareza na análise dos resultados obtidos.

A revisão bibliográfica com foco na Teoria de Potência Conservativa é o alicerce do trabalho, uma vez que a fundamentação matemática explicitada no estudo teórico é implementada fielmente na simulação computacional. O êxito alcançado neste trabalho, e exibido no Capítulo 5, passa pelo fato de que a partir do momento que dado problema é compreendido, físico e matematicamente, a proposta de uma solução é mandatória, ou seja, de posse das ferramentas que a teoria estudada fornece, trabalhar em função de um dispositivo capaz de aplicar os fundamentos da teoria é um objetivo a ser perseguido até o êxito.

Com a metodologia de projeto desenvolvida chegou-se a confecção do sistema elétrico trifásico a ser compensado, junto do desenvolvimento do filtro com malhas de controle ajustadas conforme necessidade do desempenho esperado; além do dimensionamento físico dos principais elementos do FAP para implementação em bancada.

De acordo com os resultados e desempenho verificados fica evidente o êxito alcançado no trabalho tendo em mente os objetivos principais: fazer a compensação ativa de um sistema trifásico em corrente alternada com FAP implementando a Teoria

de Potência Conservativa. Visualiza-se nas formas de onda de corrente apresentadas no Capítulo 5 o poder de atuação do FAP na compensação de cargas não lineares, bindando a fonte CA (rede elétrica) da influência dos harmônicos de corrente.

6.1 Trabalhos futuros

A sequência natural deste trabalho seria a implementação física do FAP, ou seja, construir o dispositivo de acordo com as especificações de projeto do Capítulo 3, havendo ainda desafios como o condicionamento de sinais para uma plataforma de controle digital e a devida programação do hardware para desempenhar o papel dos controladores.

Uma outra opção, antes de partir para execução física, é expandir a atuação do FAP para sistemas trifásicos desequilibrados. A abordagem deste trabalho foi específica para sistemas equilibrados. Seria necessário implementar um quarto braço inversor para o FAP e adequar os cálculos de corrente e potência levando em consideração os valores de desequilíbrio, sendo necessário sensoriar cada fase individualmente, sem fazer cálculos assumindo o equilíbrio conforme feito nesse trabalho.

Por fim, evoluindo a ideia da implementação física, seria interessante pensar na fusão do FAP com inversores para acionamento de MITs, dessa forma o acionador além de proporcionar a solução para controle de velocidade de motores de indução, também faria com que a carga pudesse ser modelada, pelo ponto de vista da rede elétrica, como uma resistência, drenando apenas potência ativa.

Referências Bibliográficas

[1] DE SOUZA, FABIANA PÖTTKER. Correção do fator de potência para instalações de baixa potência empregando filtros ativos [Florianópolis] 2000, (UFSC, Dr., Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2000) Tese - Universidade Federal de Santa Catarina.

[2] FENILI, MURILO DE PIERI. Estudo e implementação de um filtro ativo paralelo monofásico de 8 kVA [Florianópolis] 2007, (UFSC, Msc., Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2007) Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina.

[3] FRAISSAT, FERNANDO BUZZO. Estudo da teoria de potência conservativa para análise de sistemas elétricos [Bauru] 2011, (FEB/UNESP, Msc., Programa de mestrado em engenharia elétrica, 2011) Dissertação - Universidade Estadual Paulista, FEB.

[4] L. B. G. Campanhol. Filtro Ativo de Potência Paralelo Utilizando Inversores Monofásicos Full-Bridge Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro-Fios [Cornélio Procópio] 2012, (UTFPR, Msc., Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2012) Dissertação - Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

[5] LINDEKE, DIRK. Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kVA usando técnicas de controle digital e analógico [Florianópolis] 2003, (INEP/UFSC, M.Sc., Engenharia Elétrica, 2003) Dissertação – Universidade Federal de Santa Catarina, INEP.

[6] M. H. RASHID. Eletrônica de potência. dispositivos, circuitos e aplicações. Tradução de L. Abramowicz, 2014.

[7] NISE, NORMAN S. Engenharia de Sistemas de Controle. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN: 978-0470-54756-4.

[8] ORTMANN, MÁRCIO SILVEIRA. Filtro ativo trifásico com controle vetorial utilizando DSP: projeto e implementação [Florianópolis] 2008, (UFSC, Msc., Programa de pós-graduação em engenharia elétrica, 2007) Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina.

[9] PAREDES, HELMO KELIS MORALES. Teoria de Potência Conservativa [Campinas] 2011, (FEEC/UNICAMP, Dr., Departamento de Sistemas de Energia Elétrica, 2011) Tese – Universidade Estadual de Campinas, FEEC.

[10] TENTI, PAOLO. Conservative Power Theory. Department of Information Engineering. University of Padova.