Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Engenharia Elétrica

Trabalho de Conclusão de Curso

Estudo de Filtro Ativo de Potência Conectado à Rede de Distribuição

José André Tebar de Faria

João Monlevade, MG

2018

José André Tebar de Faria

Estudo de Filtro Ativo de Potência Conectado à Rede de Distribuição

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.
Orientador: Prof. Gabriel Azevedo Fogli

Universidade Federal de Ouro Preto
João Monlevade
2018

F224e Faria, José André Tebar de.
Estudo de fIltro ativo de potência conectado à rede de distribuição [manuscrito] / José André Tebar de Faria. - 2018.

79f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Gabriel Azevedo Fogli.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Engenharia elétrica. 2. Energia elétrica - Controle de qualidade. 3. Eletrônica de potência. I. Fogli, Gabriel Azevedo. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Titulo.

CDU: 621.38

Catalogação: ficha.sisbin@ufop.edu.br

ANEXO IV - ATA DE DEFESA

Aos 04 dias do mês de Maio de 2018, às 8 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa de monografia pelo formando: José André de Tebar Faria, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Gabriel Azevedo Fogli, Renan Fernandes Bastos, Victor Costa da Silva Campos.

O candidato apresentou a monografia intitulada: Estudo de Filtro Ativo de Potência Conectado à Rede de Distribuição. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela Aprovação do candidato, com a nota média 8,5, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo (a) formando(a).

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

Banca Examinadora	Nota
Gabriel Azevedo Fogli	8,5
Renan Fernandes Bastos	8,5
Victor Costa da Silva Campos	8,5
Média	8,5

João Monlevade, 04 de Maio de 2018.

Gabriel Azevedo Fogli

Professor(a) Orientador(a)
Gabriel Azevedo Fogli

José André Tebar de Faria

Aluno (a)
José André de Tebar Faria

Renan F. Bastos

Professor(a) Convidado(a)
Renan Fernandes Bastos

Victor Costa da Silva Campos

Professor(a) Convidado(a)
Victor Costa da Silva Campos

Dedico este trabalho primeiramente aos meu pais, irmã e familiares que a todo momento tive junto a mim. À todos meus amigos e amigas, aos docentes que me deram apoio e aos servidores da UFOP. Dedico também todos os que entendem a importância do elétron!

Agradecimentos

Agradeço a Universidade Federal de Ouro Preto por fornecer todos os recursos possíveis ao Campus João Monlevade que me levaram a obtenção deste Título.

Agradeço ao meu orientador Gabriel A. Fogli que me apresentou o vasto campo da análise moderna de teorias de potência e pode me guiar no seu entendimento.

Agradeço a todos vocês, MEUS AMIGOS, essa vitória é nossa.

"Tudo o que você realmente precisa saber no momento é que o universo é muito mais complicado do que se poderia pensar, mesmo se você começar a partir de uma posição já pensando que ele é muito complicado."

– Douglas Adams

—

Resumo

Desde o estabelecimento dos sistemas de geração, transmissão e distribuição em corrente alternada, existem investigações a cerca de como quantizar e qualificar o fenômeno da transferência de potência. Em meados do século XX, diversos autores propuseram suas ideias a fim de criar uma teoria que tivesse o censo comum de toda comunidade mundial de como deve ser visto o sistema elétrico CA. A dificuldade de comunicação de antigamente fez com que pequenos grupos locais que se formaram criassem suas teorias de forma isolada, porém a partir da década de 1980 os trabalhos começaram a ser divulgados de forma global mostrando que algumas teorias compartilhavam conceitos muito parecidos. A Teoria das Potências Instantâneas, desenvolvida por Akagi et al., usa a abordagem no domínio do tempo para decomposição dos sinais elétricos trifásicos de tensão e corrente da base *abc* para o eixo coordenado $\alpha\beta$ através da Transformada de Clarke. Assim as parcelas de potência, p e q, são obtidas a partir do ponto de vista das coordenadas transformadas. A utilização dessa teoria faz com que seja necessário o uso de filtros para separação de parcelas médias dos sinais de potência, o que se tornou mais acessível a partir do uso de microcontroladores que realizam o processo de filtragem discreta implementado em linguagem C. Em posse das parcelas de potência, e sabido a qual fenômeno está relacionado cada parcela de potência, o texto mostra como o Filtro Ativo de Potência pode ser configurado de forma versátil para compensar as potências não ativas.

Palavras-chave: Filtro Ativo de Potência, Teoria das Potências Instantâneas, Qualidade de Energia Elétrica.

Abstract

Since the establishment of the AC systems of generation, transmission and distribution, there are investigations about how to quantize and qualify the phenomenon of power transfer. In the middle of the twentieth century, several authors proposed their ideas in order to create a theory that had the common census of all the world community of how the CA electrical system should be seen. The difficulty of communication in the past led to small local groups that were formed to create their theories in an isolated way, but from the 1980s the works began to be published in a global way showing that some theories shared very similar concepts. The Instantaneous Power Theory, developed by Akagi et al., uses a time domain approach for decomposing the three-phase electrical signals from the base *abc* to the coordinate axis $\alpha\beta$ through the Clarke's Transform. Thus the power amounts, p and q, are obtained from the point of view of the transformed coordinates. The use of this theory makes it necessary to be able to use filters for the separation of medium portions of the power signals, which became more accessible with the application of microcontrollers that perform the discrete filtering process implemented in C language. In possession of the power amounts, and knowing which phenomenon is related to each power, the text shows how the Active Power Filter can be configured in a versatile way to compensate non-active powers.

Keywords: Active Power Filter, Instantaneous Power Theory, Power Quality.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linha do Tempo - Teorias de Potência. Fonte: (CZARNECKI, 2016) . . 2
Figura 2 – Tetraedro de Potência. Fonte: (AKAGI, 2007) 4
Figura 3 – Função de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ como presença do ângulo de fase . 12
Figura 4 – Função temporal para o sinal de potência instantânea quando há defasamento entre corrente e tensão 12
Figura 5 – Representação gráfica da Potência Complexa. - Fonte: (AKAGI, 2007) 14
Figura 6 – Tensões de fase ($v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ e $v_{cn}(t)$), em sequência positiva e balanceadas para um sistema trifásico 15
Figura 7 – Tensões de fase, em sequência positiva e desbalanceadas para um sistema trifásico 15
Figura 8 – Exemplo de senóides de frequências múltiplas inteiras 17
Figura 9 – Sinal de tensão completo, contendo além de f_1, f_3 e f_5 para uma fase do sistema 17
Figura 10 – Conversor CA/CC tipo Ponte de Graetz - Fonte: (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015) 18
Figura 11 – Sinal de corrente para uma fase alimentando o conversor CA/CC . . . 19
Figura 12 – Sinal de potência instantânea, de uma fase, para conversor CA/CC - Carga RL 19
Figura 13 – Plano cartesiano contendo as bases ABC e $\alpha\beta$ - Fonte: (AKAGI, 2007) 21
Figura 14 – Tipos de Técnicas de Filtragem de sinais elétricos - Fonte: (MIKKILI; PANDA, 2016) 25
Figura 15 – Conexão do FAP em paralelo ao PAC - Adaptado de: (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015) 26
Figura 16 – Diagrama de Controle de corrente para o FAP tipo Shunt - Fonte: (AKAGI, 2007) 28
Figura 17 – Componente do sistema que representa a rede de distribuição - Fonte: (AKAGI, 2007) 30
Figura 18 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015) 31
Figura 19 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015) 31
Figura 20 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015) 32
Figura 21 – Filtro Ativo de Potência - Fonte: (AKAGI, 2007) 33
Figura 22 – Cálculo das correntes de compensação 34
Figura 23 – Controle por histerese 37

Figura 24 – Exemplo de obtenção das bandas de histerese. 38
Figura 25 – Gráfico 1: Tensão no barramento CC do FAP. / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte. 38
Figura 26 – Malha de controle para tensão do barramento CC - FAP 39
Figura 27 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 41
Figura 28 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente antes da compensação. 42
Figura 29 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas. 43
Figura 30 – Gráfico 1: Sinais de referência calculado para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas 43
Figura 31 – Banda superior e inferior limitando a corrente de saída do FAP para fase A. 44
Figura 32 – Gráfico 1: Correntes trifásicas drenadas pela fonte / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 44
Figura 33 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento. 45
Figura 34 – Resposta do FAP. 45
Figura 35 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte. 46
Figura 36 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 47
Figura 37 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente antes da compensação. 47
Figura 38 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas 48
Figura 39 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 49
Figura 40 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico. 49
Figura 41 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento. 50
Figura 42 – Resposta do FAP. 50
Figura 43 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte. 51
Figura 44 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 52

Figura 45 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para o sinal de corrente antes da compensação de correntes harmônicas. 52
Figura 46 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas. 53
Figura 47 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 53
Figura 48 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico. 54
Figura 49 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento. 54
Figura 50 – Resposta do FAP. 55
Figura 51 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte. 55
Figura 52 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 56
Figura 53 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas. 56
Figura 54 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas. 57
Figura 55 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico. 57
Figura 56 – Resposta do FAP. 58
Figura 57 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte. 58

Lista de tabelas

Tabela 1 – Sistema Trifásico 29
Tabela 2 – Amplitudes I_n e IHD_n para o sinal de corrente da fase A, para o retificador não controlado com carga RL 42
Tabela 3 – Parâmetros do sistema, para o retificador não controlado com carga RL 46
Tabela 4 – Amplitudes I_n e IHD_n para o retificador não controlado com carga RC 48
Tabela 5 – Parâmetros do sistema, para o retificador não controlado com carga RC. 51
Tabela 6 – Amplitudes I_n e IHD_n para o sinal de corrente da fase A, para o retificador controlado com carga RL. 53
Tabela 7 – Parâmetros do sistema, para o retificador controlado com carga RL . . 55
Tabela 8 – Parâmetros do sistema, para carga RL trifásica 57

Lista de abreviaturas e siglas

LTI	Linear Invariante no Tempo
FAP	Filtro Ativo de Potência
CC/CA	Corrente Contínua para Corrente Alternada
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
THD	*Total Harmonic Distortion*
IHD	*Individual Harmonic Distortion*
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
CSI	*Current Source Impose*
VSI	*Voltage Source Impose*

Lista de símbolos

P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Aparente
FP	Fator de Potência
S	Potência Complexa
p	Potência Ativa Instantânea
q	Potência Reativa Instantânea
Q_B	Potência Reativa de Budeanu
D_B	Potência de Distorção de Budeanu
V	Valor Eficaz da tensão [V]
I	Valor Eficaz da corrente [A]
V_1	Valor Eficaz fundamental da tensão [V]
I_1	Valor Eficaz fundamental de corrente [A]
I_n	Valor Eficaz para a n-ésima componente harmônica de corrente [A]
V_n	Valor Eficaz para a n-ésima componente harmônica de tensão [V]
α	Ângulo de disparo para o retificador controlado [°]
ω	Frequência angular $[\frac{rad}{s}]$
t	Tempo $[s]$
π	Constante matemática irracional definida pela razão entre o perímetro de uma circunferência e o seu diâmetro
ϕ_n	Ângulo de deslocamento entre a corrente e a tensão de ordem n-ésima [rad]
ψ_n	Ângulo de deslocamento entre fases de um sistema desbalanceado [rad]

Sumário

1 INTRODUÇÃO . . . 1
1.1 Justificativa . . . 7
1.2 Objetivos . . . 8
1.2.1 Objetivos Específicos . . . 8
1.3 Estrutura do Trabalho . . . 8

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA . . . 10
2.1 Sistema Elétrico CA em Regime Senoidal . . . 11
2.2 Sistema Elétrico CA Trifásico em Regime Senoidal Balanceado . . . 14
2.3 Sistema Elétrico CA Trifásico em Regime Senoidal Desbalanceado . 15
2.4 Sistema Elétrico CA em Regime Não Senoidal . . . 16
2.5 Cargas Conectadas ao Sistema de Distribuição . . . 18
2.6 Teoria da Potência Instantânea . . . 19
2.7 Filtro Ativo . . . 24

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA . . . 29
3.1 Rede . . . 29
3.2 Cargas . . . 30
3.2.1 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série 30
3.2.2 Retificador não controlado trifásico tipo Ponte de Graetz, com carga RC paralelo . . . 31
3.2.3 Retificador controlado trifásico tipo Ponte de Graetz, com carga RL série . 32
3.2.4 Carga trifásica RL série . . . 32
3.3 Filtro Ativo em conexão paralelo . . . 33
3.4 Cálculo das correntes de compensação . . . 33
3.5 Controle por Histerese . . . 37
3.6 Controle Barramento CC - FAP . . . 38

4 RESULTADOS . . . 41
4.1 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série . . . 41
4.2 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RC paralelo . . . 46
4.3 Retificador trifásico controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série . . . 51
4.4 Carga trifásica RL série . . . 54

5 CONCLUSÃO 59

REFERÊNCIAS 60

1 Introdução

Muitas técnicas já foram estabelecidas a fim de corrigir problemas no fornecimento de energia elétrica durante as últimas décadas. Como visto em (CZARNECKI, 2016), no fim do século XIX o engenheiro eletricista Charles Proteus Steinmetz já havia notado que, para um sistema em Corrente Alternada (CA), sob certas circunstâncias, como não-linearidades nas correntes criadas pelos fornos em usinas metalúrgicas, noções básicas que já eram conhecidas não se faziam mais válidas. Para sistemas monofásicos de tensão senoidal com uma carga Linear Invariante no Tempo (LTI), o fenômeno de deslocamento angular entre tensão e corrente se traduzia em uma parcela de potência reativa Q, que se relaciona com a potência ativa P e a potência aparente S, segundo 1.1:

$$S^2 = P^2 + Q^2 \tag{1.1}$$

O experimento de Steinmetz em fornos industriais, ainda por volta de 1892, demonstrou que calculando o valor de potência aparente S ($S = V.I$) e sob uma condição sem nenhuma parcela de potência reativa Q, a potência ativa é menor que o total de potência entregue pela fonte 1.2.

$$S^2 > P^2 + Q^2 \tag{1.2}$$

Assim, viu-se necessário encontrar uma teoria que pudesse abordar de forma separada cada termo de potencia, tanto para motivos de tarifação, quanto posteriormente para fins de compensação. Em (JELTSEMA; WOUDE; HARTMAN, 2014) o termo conhecido como Fator de Potência (FP) é definido de uma forma geral, como sendo a proporção entre a potência que transmite energia da fonte para a carga (P) e a potência total entregue pela fonte (S).

$$FP = \frac{P}{S} \tag{1.3}$$

E esta definição é, então, uma das poucas concordâncias existentes entre todas as teorias já elaboradas. Durante o último século, vários estudiosos desenvolveram e/ou aprimoraram teorias de potência CA, como mostrado na Figura 1, desde a observação de Steinmetz, passando pela definição de Budeanu (1927), Fryze (1931), Buchholtz (1950), Depenbrock (1962), Akagi (1984), Czarnecki (1984), e mais recentemente houve a atualização da parte do IEEE na recomendação 1459 (2010).

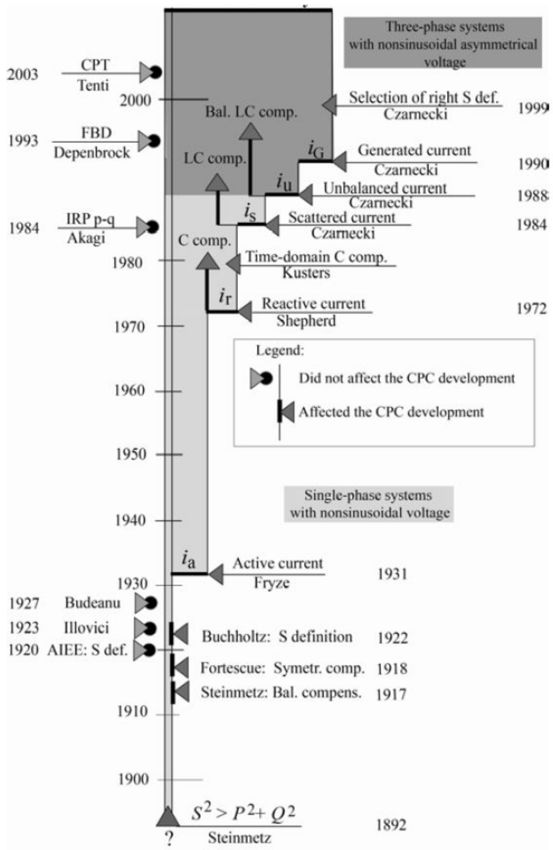

Figura 1 – Linha do Tempo - Teorias de Potência. Fonte: (CZARNECKI, 2016)

Em suma, a seguir estão dispostos alguns pontos chaves e comentários sobre as Teorias de Potência que foram descrita no último século pela Linha do Tempo da Figura 1.

- Costantin Budeanu (1927)

  Esta teoria baseia-se numa abordagem no domínio da frequência para sistemas monofásicos. Levando em consideração que o sinal de tensão e corrente são periódicos, é possível decompô-los em suas respectivas Séries de Fourier, definindo assim seus valores eficazes nas variáveis maiúsculas V e I (JELTSEMA, 2015):

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2} = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + ... + V_n^2} \tag{1.4}$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + ... + I_n^2} \tag{1.5}$$

  Assim, Budeanu salienta que em posse dos valores eficazes de tensão e corrente, a Potência Aparente pode ser obtida a partir da multiplicação direta entre os valores eficazes de tensão e corrente. E para facilitar a compreensão, a equação 1.6 mostra como pode-se entender a equação considerando os valores quadráticos:

$$S^2 = V^2 I^2 = (V_1^2 + V_2^2 + ... + V_n^2)(I_1^2 + I_2^2 + ... + I_n^2) \tag{1.6}$$

Dessa forma, é possível perceber que, ao realizar as multiplicações distributivas, haverão parcelas de produtos entre correntes e tensões de mesma frequência e parcelas de produtos entre correntes e tensões de frequências diferentes. Mais a diante, pode-se então separar as parcelas de produtos entre correntes e tensões de mesma frequência em duas parcelas previamente conhecidas como Potência Ativa (P) e Potência Reativa(Q_B), na qual o subíndice B denota o nome de Budeanu, e outra parcela fruto dos produtos entre frequências diferentes chamado por D_B, como definido através de manipulações algébricas e trigonométricas em:

$$\begin{aligned} S^2 = (\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos\phi_n)^2 + (\sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin\phi_n)^2 \\ + \sum_{n=1}^{h-1} \sum_{m=n+1}^{h} [(V_n I_m)^2 + (V_m I_n)^2 - 2 V_n V_m I_n I_m \cos(\phi_n - \phi_m)] \end{aligned}$$

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \tag{1.7}$$

Portando os valores de potência ativa P e potência reativa Q_B são derivados da definição clássica em regime senoidal, porém agora considerando todas as frequências presentes nos sinais de corrente e tensão (JELTSEMA; WOUDE; HARTMAN, 2014). Assim, a denominada Potência de Distorção (D_B) para Budeanu se obtém a partir da diferença quadrática, como vista na equação 1.8:

$$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 \tag{1.8}$$

Considerando as parcelas de potência ortogonais, este entendimento traz consigo a ideia do tetraedro de potência, Figura 2.

Sabe-se, hoje em dia, que esta formulação apresenta desvios de entendimento (CZARNECKI, 1987). Budeanu apesar de parecer tem descrito de forma eficaz os fenômenos elétricos presentes na transmissão de potência CA, não o fez com muitos critérios matemáticos e assim não é possível identificar e associar componentes de corrente a parcelas de potência. Além de não comprovar a ortogonalidade esperada entre as parcelas de potência obtidas.

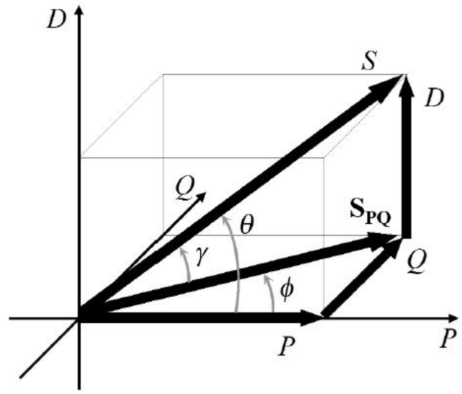

Figura 2 – Tetraedro de Potência. Fonte: (AKAGI, 2007)

- Stanisław Fryze (1931)

  Por outro lado, Fryze definiu seus valores eficazes de corrente e tensão no domínio do tempo (BALCI; HOCAOGLU, 2010). Considerando, novamente, a periodicidade de ambos os sinais é possível encontrar os parâmetros segundo 1.9 e 1.10:

$$V = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} \tag{1.9}$$

  De forma análoga:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2(t)dt} \tag{1.10}$$

  Seguindo a lógica de circuitos elétricos, a potência aparente, para Fryze se dava pelo produto entre os valores eficazes de corrente e tensão:

$$S = VI \tag{1.11}$$

  O cálculo da potência ativa, então, considera-se que será obtido a partir do valor médio da potência instantânea $p(t)$, por .

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^T v(t)i(t)dt \tag{1.12}$$

  Fryze, então, propõe que a decomposição da corrente $i(t)$ em duas parcelas que ele denominou de corrente ativa ($i_a(t)$) e corrente não ativa[1] ($i_{na}(t)$).

[1] Melhor tradução da palavra usada por ele na sua língua nativa.

Considerando os valores de potência ativa e tensão eficaz, definiu-se assim um valor de condutância equivalente G_a, da forma:

$$G_a = \frac{P}{V^2} \tag{1.13}$$

Pois assim a decomposição de Fryze para a corrente ativa e não ativa se dão pelas equações 1.14 e 1.15:

$$i_a(t) = \frac{P}{V^2}v(t) = G_a v(t) \tag{1.14}$$

$$i_{na}(t) = i(t) - i_a(t) \tag{1.15}$$

Para um sistema monofásico com sinais de corrente e tensão periódicos, a potência ativa e tensão eficaz são constantes, logo a condutância equivalente também será, representando o montante ativo que a carga demanda.

Então, como visto nas teorias de Budeanu e Fryze, existem formas distintas de se obter valores para corrente e para tensão. Budeanu, com sua abordagem no domínio da frequência, precisa extrair valores de amplitudes e fase para as distintas harmônicas presentes nos sinais para depois realizar os cálculos de potência. Já Fryze, realiza seus cálculos no domínio do tempo.

Em sequência, existiram também estudiosos que fizeram algumas adaptações em teoria existente e outros que optaram por desenvolver teorias próprias. Como por exemplo:

- Buchholtz (1950)

  Buchholtz estendeu a teoria de Fryze para sistemas polifásicos, na qual a grande contribuição foi a definição de valores coletivos para as variáveis (THAHAB; ASUMADU, 2017). Assim quando analisa-se, por exemplo um sistema trifásico, o valor coletivo faz com que o sistema seja visto como um circuito homogêneo, ou seja, nenhum dos condutores é tratado de forma especial.

  Para compreensão, as equações 1.16 e 1.17, definem como os valores coletivos para corrente e tensão em um sistema polifásico genérico:

$$V_{\sum} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^{m} v_\mu^2} \tag{1.16}$$

$$I_{\sum} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^{m} i_\mu^2} \tag{1.17}$$

Na qual o sub-índice μ denota a fase do sistema. Assim todos os parâmetros introduzidos posteriormente por ele levam em consideração a ideia de valores coletivos.

- Depenbrock (1962)

  Mais a diante, após a distinção de outras parcelas de correntes, Depenbrock então define a Teoria FBD. O nome da teoria conta as iniciais de Fryze, pela definição e a concordância sobre como a parcela ativa é obtida, Buchholtz que estendeu a análise para sistemas polifásicos. As correntes propostas por Depenbrock são semelhantes às correntes ativa e reativa de Akagi et al., apesar de realizadas de forma completamente distinta (THAHAB; ASUMADU, 2017). Também permite o projeto de compensadores passivos ou ativos, com ou sem armazenadores de energia.

- Akagi (1984)

  A Teoria da Potência Instantânea (Teoria pq) baseia-se num conjunto de definições de potências instantâneas no domínio do tempo para circuitos trifásicos (AKAGI; OGASAWARA; KIM, 2001) com ou sem condutor de neutro. Os trabalhos apresentados por Akagi et al. trazem provavelmente as maiores contribuições feitas na área de filtragem ativa nos últimos 30 anos utilizando uma transformação de eixos do sistema trifásico convencional (abc), para um sistema ortogonal ($\alpha\beta 0$).

  Do ponto de vista de compensação, a teoria pq pode ser aplicada com dois objetivos principais:

  1. Garantir potência constante no PAC.
  2. Garantir correntes senoidais e equilibradas no PAC.

  Os dois objetivos só podem ser atendidos simultaneamente quando as tensões no PAC forem senoidais e equilibradas. Em quaisquer outras condições de tensão (distorções e/ou assimetrias), os objetivos só podem ser atendidos isoladamente. Isto significa que o resultado final da compensação depende diretamente das tensões do PAC e do objetivo escolhido para uma dada aplicação.

- Czarnecki (1984)

  A abordagem de Czarnecki foi desenvolvida no domínio da frequência (CZARNECKI, 1988). O autor utiliza os valores das várias condutâncias, susceptâncias e admitâncias para cada componente harmônica, para propor uma metodologia de decomposição dos sinais de corrente e potência. Esta proposta utiliza uma abordagem vetorial bastante sofisticada que busca associar as diferentes parcelas de corrente/potência com os fenômenos físicos e recentemente o autor denominou sua proposta de Teoria das Componentes Físicas de Corrente, do inglês, *Theory of the Current's Physical Components* (CPC).

Czarnecki tem contribuído para discussões como a necessidade ou não da definição de potência aparente, visto que esta é muito mais uma interpretacão matemática do que física, bem como para estudos de compensadores ativos ou passivos e ainda para desmistificar determinadas teorias (Budeanu, Fryze, Akagi, etc) ou questionar sobre quais deveriam ser os verdadeiros requisitos para a definição de uma "teoria de potências".

- IEE STD 1459 (2010)

  Alexander Emanuel, coordenador do grupo de trabalho "Working Group" formado pelo IEEE desde início da década de 90, é responsável pela publicação da Std 1459-2000, e recentemente atualizada, IEEE-1459-2010 (COMMITTEE; MEASUREMENT, 2010), e de inúmeros trabalhos envolvendo novas definições relacionadas às quantidades de potência sob condições não senoidais e desequilibradas. Com a publicação da STD 1459, o IEEE abandonou as definições de potência aparente aritmética e vetorial e passou a utilizar uma derivação das definições de Buchholz, o qual introduziu a notação de potência aparente efetiva, tensão e corrente efetiva (equivalente).

Porém a grande variedade de problemas encontrados na distribuição de energia força os sistemas de controle atuais a serem cada vez mais flexíveis quanto a sua atuação. Ferramentas de análise de fluxo de potência CA são aprimoradas a fim de facilitar a compreensão do comportamento do sistema e assim, descrever de forma mais fiel as variáveis que envolvem, quantificam e qualificam a transferência de potência CA.

Este trabalho compreende no levantamento de características do sistema elétrico CA, através da medida de variáveis elétricas como tensão e corrente, e a partir das medidas, usar ferramentas matemáticas que consigam mostrar como o sistema transfere potência para cargas conectadas a ele.

Em posse dos parâmetros certos, o trabalho tem o intuito de modelar, simular e controlar um dispositivo eletrônico conhecido como Filtro Ativo de Potência (FAP) que tem a capacidade de colaborar com a forma em que o sistema de distribuição irá se comportar.

1.1 Justificativa

Visto que atualmente o número de cargas não lineares conectadas ao sistema de distribuição tem aumentado significativamente, é necessário o desenvolvimento de dispositivos que possam atuar no sistema elétrico a fim de estabilizar e/ou controlar o fluxo de potências ativas e não ativas.

É interessante notar que tal sistema de controle como esse pode fornecer suporte flexível para diversos problemas existentes na geração, transmissão e/ou distribuição. Pode haver um trabalho em conjunto com outros sistemas de compensação para que resultados melhores possam ser alcançados. Porém, há grande diversidades de técnicas que podem ser empregadas para controle de um Filtro Ativo de Potência e este trabalho propõe uma solução para este problema de qualidade.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como finalidade o estudo da Teoria da Potência Instantânea (Teoria pq) para distinção de fenômenos, compensação de potência reativa e correntes harmônicas existentes na transferência de potência trifásica com cargas lineares e não lineares, para então, controlar um FAP de forma flexível aumentando a qualidade de energia elétrica vista pela fonte.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Interpretação das parcelas de potência calculadas pela teoria.
- Desenvolvimento de uma técnica de controle para um conversor CSI.

1.3 Estrutura do Trabalho

O texto está divido de uma maneira que o tema seja compreendido por completo e com maior facilidade, sendo que o Capítulo 2 - Referências Bibliográficas - primeiramente define conceitos básicos que precisam ser muito bem compreendidos para que as parcelas de potência encontradas na Teoria da Potência Instantânea possam ser interpretadas mais a diante. O Filtro Ativo de Potência é caracterizado e qualificado na seção 6 deste mesmo capítulo.

Para fins de comprovação da teoria, o Capítulo 3 - Descrição do Sistema - apresenta quais serão os componentes que farão parte da simulação. Desde quais os parâmetros da fonte, até quais os perfis de cargas que serão simulados e técnicas de controle que devem ser realizadas para que os resultados esperados fossem atingidos.

O Capítulo 4 - Resultados - irá mostrar quais e como os indicadores de qualidade de energia se comportaram após a inserção do FAP no sistema eletrico para cada perfil de carga conectado ao PAC.

E por fim o capítulo 5 - Conclusão - apresentará o que pode ser desenvolvido com o dispositivo de controle de potências além de deixar novos paradigmas a ser estudado sobre o assunto.

2 Revisão Bibliográfica

Para o desenvolvimento do sistema proposto, foi necessário realizar um levantamento de quais abordagens são viáveis para a análise do comportamento dos sistemas de potência CA. A aplicação dos Filtros Ativos foram estudadas por (AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984), usando a Teoria da Potência Instantânea, a fim de lidar com os problemas relacionados a qualidade da energia elétrica. A teoria usada descreve, usando as medidas de tensões e correntes instantâneas vista pela fonte, como o Filtro Ativo, conectado em paralelo, que pode gerar correntes em seus terminais a fim de fazer com que a fonte trifásica entregue correntes de linha, em fase e livre de componentes harmônicos com as respectivas tensões da fonte. Há necessidade de uma aplicação como esta devido ao aumento de cargas não-lineares conectadas ao sistema de potência, sendo que a não linearidade imposta por essas cargas forçam o sistema a entregar correntes que podem absorver parcelas de potência reativa, que está relacionada com o defasamento angular entre as componentes fundamentais de tensão e corrente, além de apresentar componentes harmônicos de frequência presentes principalmente nas correntes de linha. Segundo a proposta de (AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984), e usando alguma técnica de controle para acionar os componentes semicondutores do conversor trifásico tipo CC/CA, pode-se compensar a potência não ativa vistas pela fonte para que o sistema não seja impregnado por correntes harmônicas que ocupam, de formar reativa, os condutores.

Ainda em sequência, (WILLEMS, 1992) mostra que para sistemas trifásicos sob comportamentos não senoidais, a abordagem da Teoria da Potência Instantânea é de grande valia para a compensação de potências não ativas. Usando a Transformação de Clarke, ou seja, transformando as três tensões e três correntes de linha para duas componentes $\alpha\beta$ - pelo fato da análise ser feita à três fios não existe a componente 0 - a definição das correntes de compensação são feitas e por fim volta-se para as componentes originais ABC, assim podendo acionar os semicondutores, independente da forma que será feita.

Em (PENELLO; WATANABE, 1993) é descrito de uma forma objetiva o método em que são escolhidas as potências, ou pelo menos parcelas dessas potências, que serão compensadas. O autor mostra que após calcular a potência ativa (p) e a potência não ativa (q) estas podem ser decompostas em suas parcelas médias e oscilatórias, e assim dependendo da aplicação o Filtro Ativo pode operar da forma que se espera.

De maneira progressiva, (BENGHANEM; ALRADADI; DRAOU, 2006) e (DEB et al., 2013) mostram que a aplicação do Filtro Ativo em um sistema de potência consegue, de uma forma geral, amenizar o impacto tanto do defasamento entre a componente fundamental da corrente em relação a tensão, quanto a distorção harmônica criada pelas cargas não lineares conectadas ao sistema.

Grande parte das definições usadas neste texto são apresentadas de forma a manter o padrão criado pela IEEE na norma conhecida como 1459, (COMMITTEE; MEASUREMENT, 2010). Neste documento são apresentados quais são os parâmetros que devem ser levados em consideração para quando é necessário realizar análise de circuitos em CA. Para sistemas CA monofásicos e trifásicos puramente senoidais, a norma define quantidades como, Potência Aparente (S), Potência Ativa (P), Potência Reativa (Q), Fator de Potência de Deslocamento(λ). Já, sistemas que apresentam perfis harmônicos precisam de outras medidas que possam diferenciar cada forma de onda com suas características específicas, como, Distorção Harmônica Total para corrente (THD_i), Distorção Harmônica Total para tensão (THD_v) além de outras parcelas da potência instantânea que são classificadas como não ativas.

Para a caracterização de problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica os livros, (MIKKILI; PANDA, 2016), (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015) e (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015) foram usados como referência. Neles são abordados diretamente os maiores problemas que podem existir quando há a necessidade de transferir energia elétrica através de corrente alternada, principalmente quando a distorção harmônica é um fator marcante.

2.1 Sistema Elétrico CA em Regime Senoidal

Os sistemas de potência trifásicos de distribuição operam em corrente alternada (CA), e considerando o sistema elétrico como um barramento infinito espera-se que haja um comportamento senoidal puramente $60Hz$, tanto da corrente quanto da tensão. Dentro da análise de sistemas sob regime senoidal é possível definir duas parcelas de potências transferidas entre uma fonte e cargas conectadas: Potência Ativa (P) e Potência Reativa (Q). Essas duas quantidades podem ser obtidas a partir da obtenção da função temporal da potência $p(t)$, segundo (AKAGI, 2007).

Sabendo que, para um sistema monofásico, na presença de uma carga linear, o sinal de corrente $i(t)$ pode estar adiantado ou atrasado um ângulo ϕ do sinal de tensão, então têm-se as funções temporais:

$$v(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t) \tag{2.1}$$

$$i(t) = \sqrt{2}I_1 \cos(\omega t + \phi) \tag{2.2}$$

Na qual o subscrito numérico indica o o valor eficaz da componente n-ésima. A Figura 3 mostra o comportamento temporal das funções de tensão e corrente.

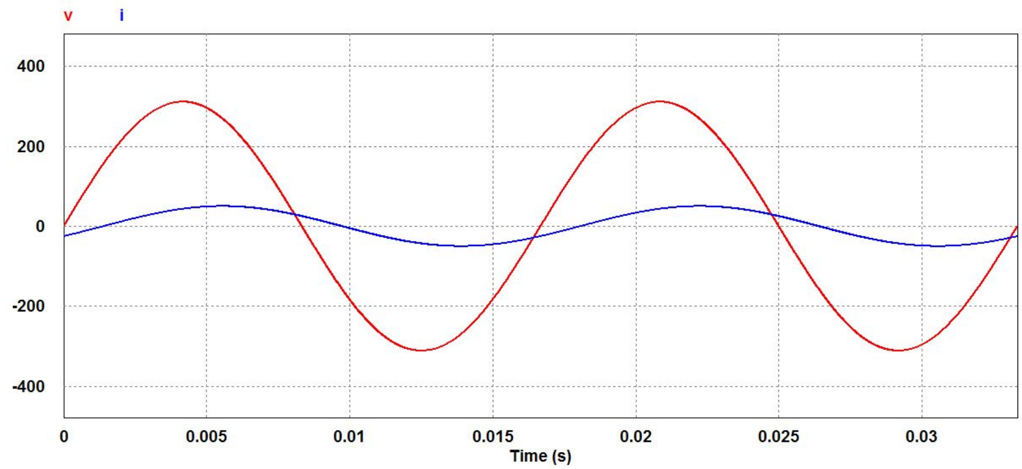

Figura 3 – Função de tensão $v(t)$ e corrente $i(t)$ como presença do ângulo de fase

Logo, a função da potência é dada pela multiplicação, no tempo, entre tensão e corrente:

$$p(t) = v(t)i(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t)\sqrt{2}I_1 \cos(\omega t + \phi) \tag{2.3}$$

Considerando um ângulo de fase ϕ de 30º em atraso, a Figura 4 mostra como a potência instantânea é transferida para um sistema CA em regime permanente.

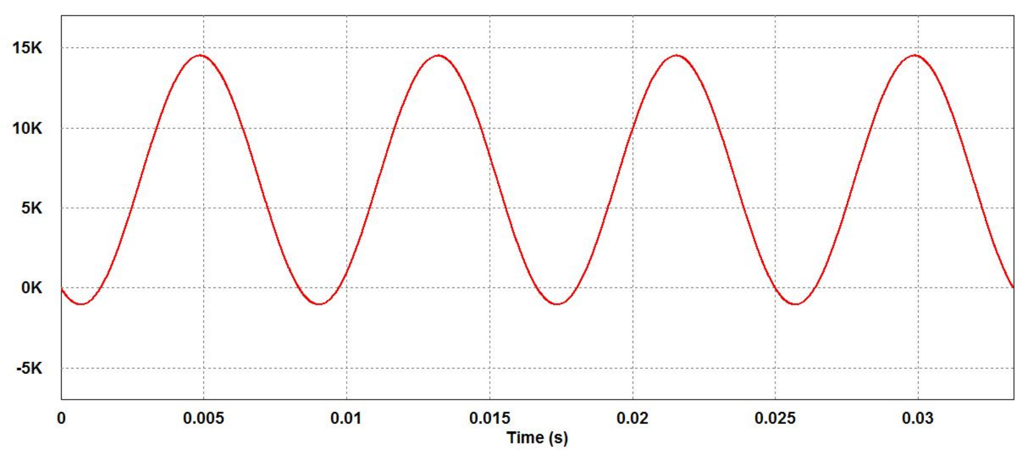

Figura 4 – Função temporal para o sinal de potência instantânea quando há defasamento entre corrente e tensão

Segundo o gráfico da função de potência instantânea mostrado acima, é possível perceber que o sinal possui tanto uma componente oscilatória, quanto um componente média não nula.

Usando relações trigonométricas, pode-se então rearranjar a equação 2.3 para que possamos qualificar o sistema em relação aos termos que estão presentes no equacionamento da potência instantânea.

$$p(t) = V_1 I_1 \cos(\phi)[1 - \cos(2\omega t)] - V_1 I_1 \sin(\phi)\sin(2\omega t) \tag{2.4}$$

O primeiro termo da função $p(t)$, que é formado por um valor médio e uma componente oscilatória em 2ω que sempre será um valor positivo, é a parcela ativa da potência que flui da fonte para a carga. O segundo termo da função apresenta um valor médio nulo e oscila na frequência 2ω, ou seja, não realiza trabalho dentro do período.

Assim, o valor médio do primeiro termo da função de potência instantânea é chamado de Potência Ativa P e o módulo de oscilação do segundo termo é conhecido como Potência Reativa Q, relacionado com o deslocamento existente entre as tensões e correntes. (AKAGI, 2007)

$$P = V_1 I_1 \cos(\phi) \tag{2.5}$$

$$Q = V_1 I_1 \sin(\phi) \tag{2.6}$$

Dessa forma, pode-se reescrever a função da potência instantânea em função dos valores de amplitude para as duas parcelas.

$$p(t) = P[1 - \cos(2\omega t)] - Q\sin(2\omega t) \tag{2.7}$$

Outro parâmetro de medida associado ao sistema CA é a Potência Aparente (S). Neste caso a quantidade é obtida através do produto entre os valores médios quadráticos de tensão e corrente diretamente, pois os sinais se apresentam como senóides puras.

$$S = VI \tag{2.8}$$

Considerando as funções de tensão e corrente como fasores, é possível definir, através do produto entre eles a Potência Complexa ($\mathbf{S}$) do sistema. Para que o montante reativo (Q) calculado pelo produto fasorial seja coerente com o mostrado na equação 2.6, o fasor de tensão é multiplicado pelo conjugado da corrente.

$$\mathbf{S} = \dot{V}\dot{I}^* = (V_1\underline{/0})(I_1\underline{/\phi})^* = V_1 I_1 \cos(\phi) + \mathbf{j}V_1 I_1 \sin(\phi) \tag{2.9}$$

Para sistemas CA com cargas lineares, os valores da Potência Aparente S e da Potência Complexa $\mathbf{S}$ se apresentam os mesmos, devido a característica monofrequência do sinal de tensão e corrente.

A disposição geométrica deste conjunto de fasores de potências é mostrado na Figura 5, também conhecido como triângulo de potências.

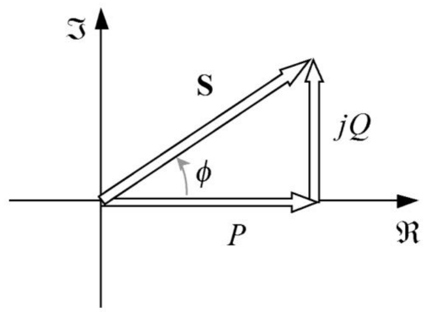

Figura 5 – Representação gráfica da Potência Complexa. - Fonte: (AKAGI, 2007)

Essa abordagem abre caminho para a definição de um parâmetro chamado Fator de Potência de Deslocamento (λ), que depende do ângulo ϕ de deslocamento entre tensão e corrente. E segundo a forma gráfica das potências também pode ser calculado a partir da razão entre a Potêcia Ativa (P) e a Potência Aparente (S).

$$\lambda = FP = \cos(\phi) = \frac{P}{S} \tag{2.10}$$

2.2 Sistema Elétrico CA Trifásico em Regime Senoidal Balanceado

De maneira ideal, pode-se definir as funções temporais para as tensões nas três fases $v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ e $v_{cn}(t)$, para fins de análise matemáticas dos sinais que envolvem o circuito trifásico.

$$v_{an}(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t) \tag{2.11}$$

$$v_{bn}(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t - 2\pi/3) \tag{2.12}$$

$$v_{cn}(t) = \sqrt{2}V_1 \cos(\omega t + 2\pi/3) \tag{2.13}$$

Sendo que V_1 é o valor eficaz da tensão de fase e ω é a frequência angular do sistema.

Quando os fasores das tensões, em análise no caso, possuem valores de pico (V_p) iguais e o desafamento de angular $\pm 2\pi/3$ entre si, define-se o sistema como balanceado ou simétrico.

A Figura 6 mostra o comportamento das tensões de fase para as funções descritas acima, sendo respectivamente em vermelho, azul e verde as tensões $v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ e $v_{cn}(t)$.

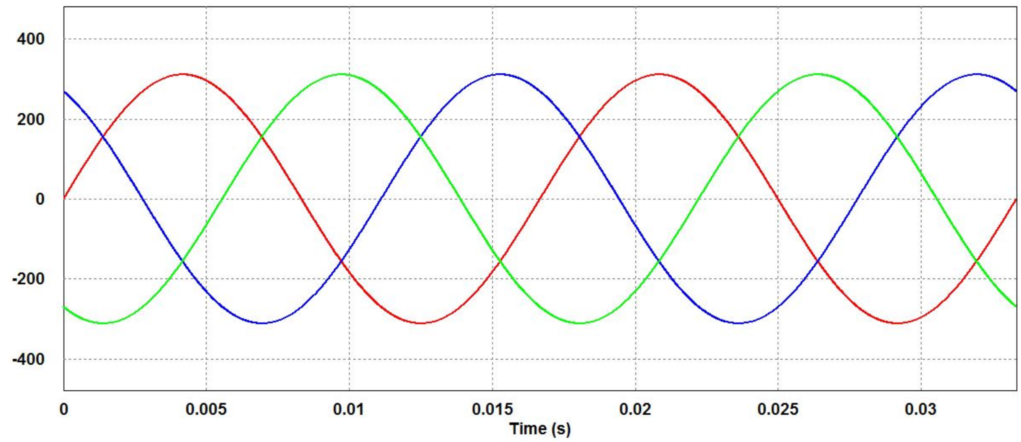

Figura 6 – Tensões de fase ($v_{an}(t)$, $v_{bn}(t)$ e $v_{cn}(t)$), em sequência positiva e balanceadas para um sistema trifásico

2.3 Sistema Elétrico CA Trifásico em Regime Senoidal Desbalanceado

Devido a problemas na qualidade da energia fornecida, o sistema elétrico pode apresentar um deslocamento diferente de $\pm 2\pi/3$ entre fases e valores de pico diferentes, o que classifica o sistema como desequilibrado e/ou assimétrico (AKAGI, 2007), como na Figura 7.

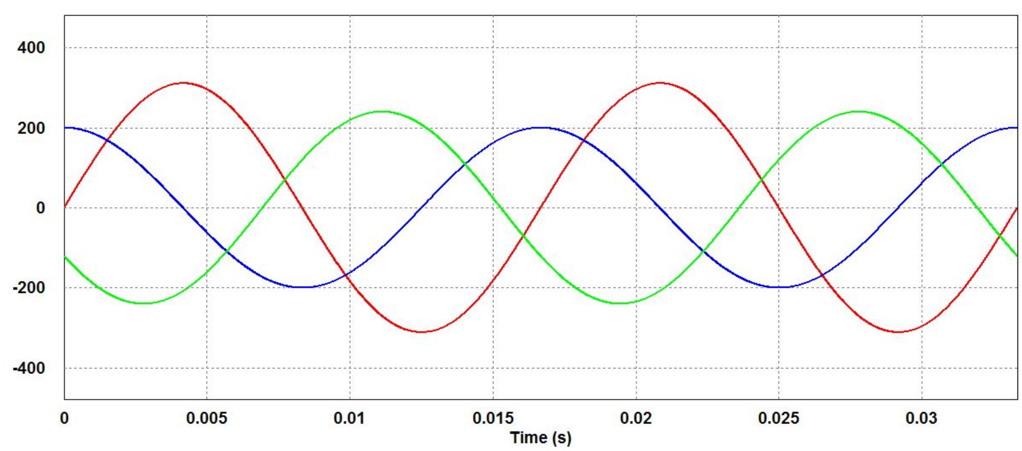

Figura 7 – Tensões de fase, em sequência positiva e desbalanceadas para um sistema trifásico

Neste caso as formas de onda das tensões ou correntes de linha perdem as característica de similaridade e passam a a se apresentar das formas:

$$v_{an}(t) = V_a \cos(\omega t + \psi_a) \tag{2.14}$$

$$v_{bn}(t) = V_b \cos(\omega t + \psi_b) \tag{2.15}$$

$$v_{cn}(t) = V_c \cos(\omega t + \psi_c) \tag{2.16}$$

Na qual V_a, V_b e V_c são os valores de pico das tensões nas fases A, B e C, e ψ_a, ψ_b e ψ_c são os defasamentos angulares respectivos de cada fase.

Como visto em (FORTESCUE, 1918), é possível decompor este sistema desequilibrado e/ou assimétrico em outros dois sistemas equilibrados e simétricos (componente positiva e componente negativa) mais outro termo (componente zero), e então para fins práticos utiliza-se a componente positiva para cálculos posteriores.

2.4 Sistema Elétrico CA em Regime Não Senoidal

O sistema elétrico de distribuição pode também assumir um comportamento dito não senoidal devido a presença de cargas não lineares absorvendo correntes distorcidas, porém com característica periódica. Assim, apesar da forma de onda distinguir da forma de onda puramente senoidal, o sinal na verdade é composto por uma soma de senóides de frequências múltiplas a frequência fundamental da rede (f_1), a partir da decomposição em Série de Fourier.

A Figura 8 apresenta três ondas senoidais de frequências múltiplas inteiras, ou seja, a senóide V_{f1} está numa frequência angular ω, a onda V_{f3} em 3ω e V_{f5} em 5ω.

Quando essas ondas de frequências diferentes são somadas para formar uma única onda, os componentes de frequência continuam presentes, e agora a resultante não é mais uma senóide pura, mas sim uma onda que contém 3 senóides em frequência diferentes. A Figura 9 traz a forma de onda resultante da soma temporal entre as componentes harmônicas da imagem anterior, na qual a onda possui o componente fundamental, o terceiro harmônico com 40% da amplitude da fundamental e o quinto harmônico com 20% da amplitude da fundamental.

Para o caso em que os sinais de tensão e corrente não apresentam apenas os componentes fundamentais, um parâmetro calculado é usado para quantificar o montante de harmônicos presentes. Esse parâmetro é conhecido como Distorção Harmônica Total (THD, em inglês) e é calculado a partir da equação 2.17, na qual a raiz quadrada do

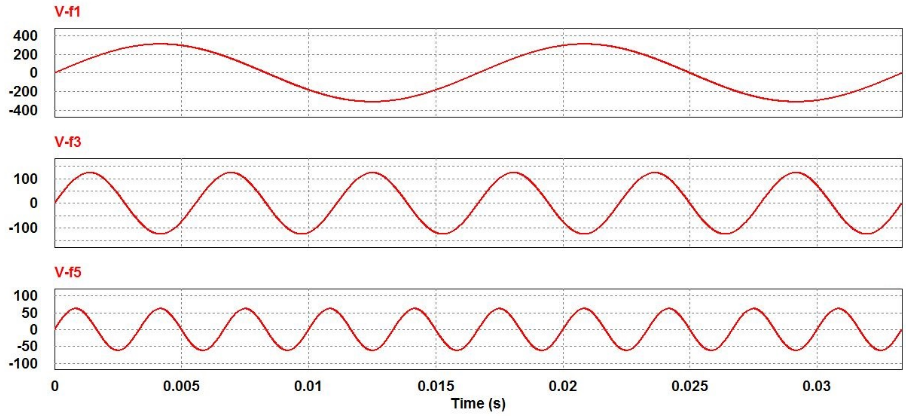

Figura 8 – Exemplo de senóides de frequências múltiplas inteiras

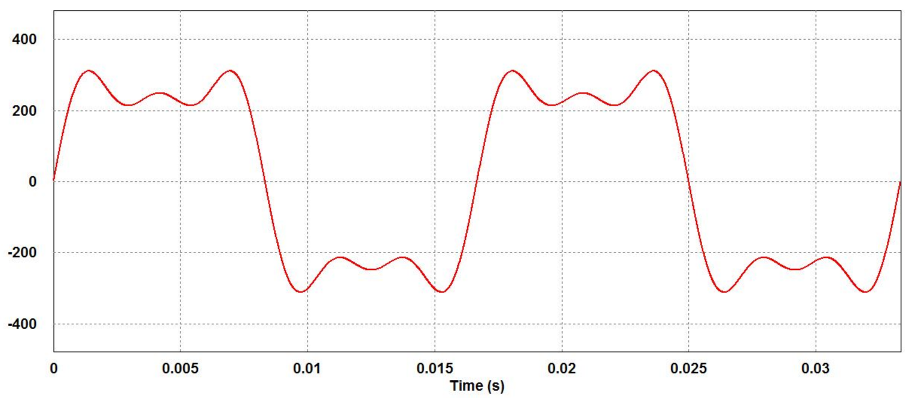

Figura 9 – Sinal de tensão completo, contendo além de f_1, f_3 e f_5 para uma fase do sistema

quadrado da soma das amplitudes de todos os harmônicos é divididas pela amplitude apenas da componente fundamental a fim de mostrar a quantidade total, em porcentagem, da existência de componentes que não sejam fundamentais. (MIKKILI; PANDA, 2016)

$$THD = \frac{\sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + ... + I_n^2)}}{I_1} \tag{2.17}$$

A inexistência de componentes harmônicos fazem com que o resultado do calculo do THD seja nulo, evidenciando que a onda em análise é uma senóide pura. O levantamento desse parâmetro, apesar de ser utilizado em muitas análises, define apenas a relação entre as amplitudes dos componentes harmônicos contidos na onda, porém não representa alguma informação a cerca da fase entre os harmônicos, o que faz com que não seja possível descrever de forma exata o comportamento temporal (forma de onda) apenas com o THD. Através do THD todas as componentes harmônicas são consideradas e assim perde-se a informação da contribuição de cada componente em si, dessa forma é interessante relevar o cálculo da distorção harmônica individual (IHD, em inglês) para cada componente segundo a equação 2.18.

$$IHD_n = \frac{In}{I_1} \tag{2.18}$$

Na qual o subscrito n indica o índice da componente harmônica.

2.5 Cargas Conectadas ao Sistema de Distribuição

Duas classes de cargas podem ser consideradas para análise do sistema de distribuição CA:

- Cargas Lineares
- Cargas Não lineares

As cargas lineares são geralmente uma associação entre cargas ativas (R), indutivas (L) e capacitivas (C). Essas cargas possuem como característica fundamental o deslocamento temporal entre o sinal de tensão e de corrente para cada fase, não inserindo componentes harmônicas no sistema. Após a disseminação da eletrônica de potência, com a invenção dos dispositivos semicondutores como diodos, SCRs e IGBTs, o número de cargas não lineares conectadas aos sistemas de distribuição aumentou exponencialmente. Os conversores CA/CC que, por exemplo, podem ser usados para acionar motores CC a partir de uma fonte trifásica CA com um circuito tipo Ponte de Graetz não controlado, traz consigo a ideia de carga não linear. A Figura 10 montra um exemplo de carga não linear, que pode ser o conversor trifásico não controlado com carga RL.

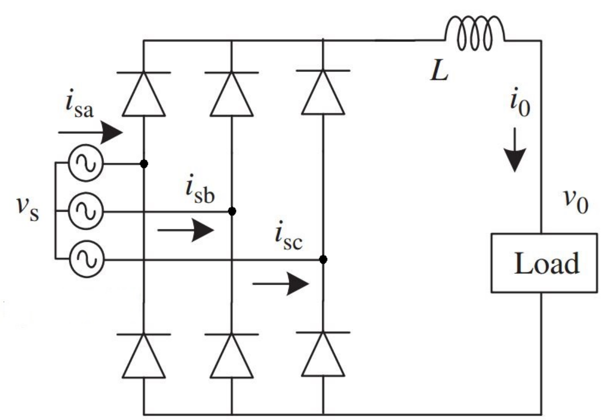

Figura 10 – Conversor CA/CC tipo Ponte de Graetz - Fonte: (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015)

Para a característica com uma indutância muito alta para o lado CC, o conversor CA/CC tem a capacidade de manter o valor de corrente absorvida em um valor específico ou ao menos em torno de um valor médio. Esse comportamento visto pelo lado CA faz com que a corrente gerada por cada fase do sistema trifásico não seja uma senóide pura, apresentando assim componentes harmônicos, como mostrado na Figura 11.

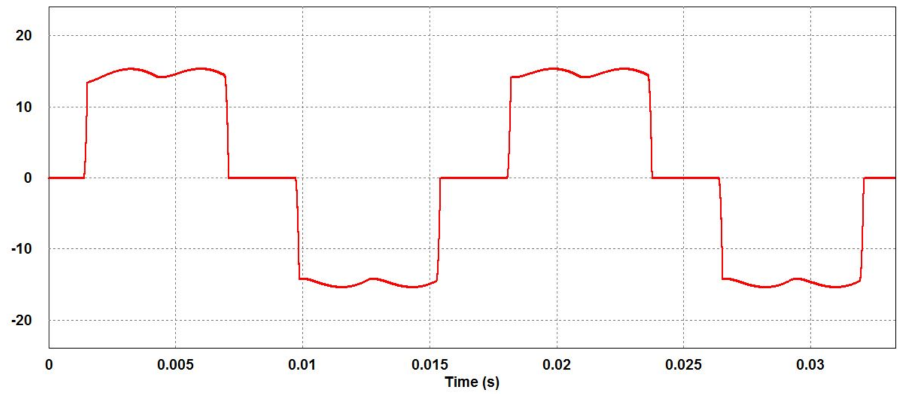

Figura 11 – Sinal de corrente para uma fase alimentando o conversor CA/CC

Apesar de que o conversor esteja sendo alimentado por tensões balanceadas e puramente senoidais, a configuração dos semicondutores impõe ao conversor uma corrente repleta de harmônicos. É interessante notar que ao se extrair a componente fundamental do sinal de corrente, devido ao fato do conversor ser do tipo não controlado, a mesma encontra-se em fase com o componente fundamental do sinal de tensão. Assim, espera-se que os valores instantâneos da potência por fase, para o retificador CA/CC com carga RL, nunca atinjam valores negativos, como mostrado na Figura 12.

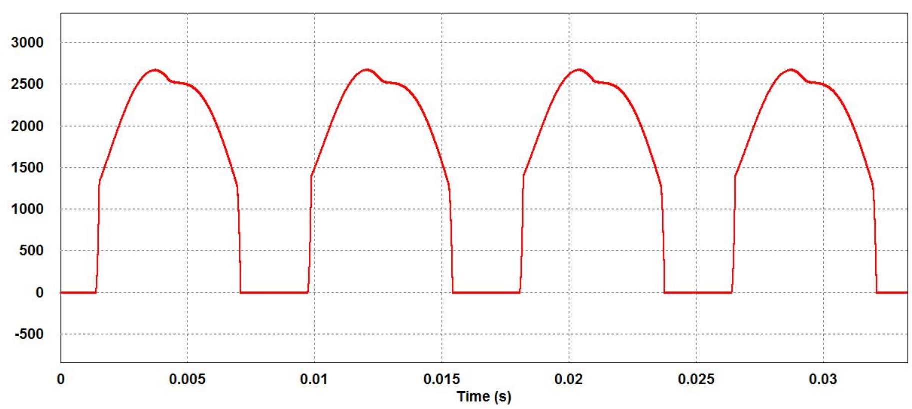

Figura 12 – Sinal de potência instantânea, de uma fase, para conversor CA/CC - Carga RL

2.6 Teoria da Potência Instantânea

Para a análise de fluxo de potência entre carga e fonte, em particular, a chamada Teoria da Potência Instantânea facilita o processo de obtenção dos valores numéricos, tanto em regime permanente, quanto durante processos transitórios por tratar as variáveis de tensão e corrente no domínio do tempo. (AKAGI, 2007)

Para o sistema trifásico de distribuição sob qualquer comportamento, seja balanceado descritos pelas equações 2.11, 2.12 e 2.13, quanto para sistemas desbalanceados, a potência ativa instantânea total trifásica ($p_{3\phi}$) é dada pela multiplicação entre as tensões de fase com as correntes de linha respectiva.

$$p_{3\phi}(t) = v_a(t)i_a(t) + v_b(t)i_b(t) + v_c(t)i_c(t) \tag{2.19}$$

Assim em posse de valores medidos para as seis variáveis envolvidas, é possível reconhecer o valor da potência ativa instantânea em função do tempo e assim fazer análise do sistema em si.

A Transformada de Clarke é utilizada a fim de diminuir o número de variáveis envolvidas para o cálculo da potência instantânea e também conseguir de forma mais clara, definir parâmetros físicos na qual o sistema elétrico está submetido. A técnica usada transforma os sinais de corrente e tensão que estão na base ABC, para uma base ortogonal entre si $\alpha\beta0$, abaixo estão as formas matriciais da Transformada de Clarke e da Transformada Inversa de Clarke, respectivamente. (AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984)

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \tag{2.21}$$

Da mesma maneira, o cálculo da transformação pode ser feito para as correntes de linha.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.23}$$

O termo multiplicativo da matriz de transformação ($\sqrt{\frac{2}{3}}$) é necessário para que os valores das potências calculados posteriormente sejam condizentes com os valores reais. A transformação pode ser representada e visualizada também pela orientação cartesiana dos vetores da base ABC e $\alpha\beta$ (Figura 13), na qual a o eixo A da base ABC é colocado em fase com o eixo α da base $\alpha\beta$, dessa forma os eixos B e C são projetados para o eixo α e β durante a transformação através de relações trigonométricas. (AKAGI, 2007) Essa abordagem se torna interessante visto que o sistema elétrico usado nas simulações não contará com o condutor de neutro, assim não haverá circulação de correntes na componente 0. Pode-se então, por questão de simplificação, omitir as parcelas que definem a componente 0. Esta simplificação não se torna útil caso no sistema elétrico esteja o condutor de neutro.

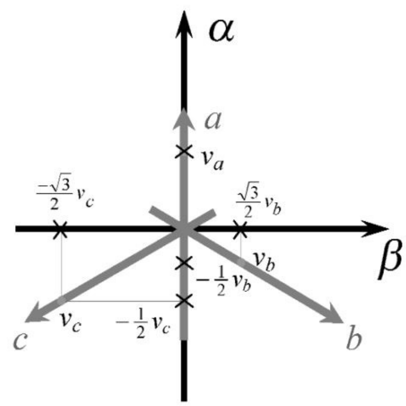

Figura 13 – Plano cartesiano contendo as bases ABC e $\alpha\beta$ - Fonte: (AKAGI, 2007)

Neste momento então, os vetores de tensão e corrente são descritos a partir de duas coordenadas $\alpha\beta$, sendo em geral da forma:

$$e = v_\alpha + \mathbf{j}v_\beta \tag{2.24}$$

$$i = i_\alpha + \mathbf{j}i_\beta \tag{2.25}$$

Considerando os novos valores de tensão e corrente na base $\alpha\beta$, o conceito de potência instantânea complexa (s) é aceito a fim de descrever o componentes presentes na análise.

$$s = e \bullet i^* \tag{2.26}$$

Substituindo os vetores de tensão e corrente do sistema de coordenadas $\alpha\beta$, na função de potência complexa instantânea e separando sua parte real e imaginária, tem-se:

$$s = (v_\alpha + \mathbf{j}v_\beta) \bullet (i_\alpha - \mathbf{j}i_\beta) = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + \mathbf{j}(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \tag{2.27}$$

Todos esses artifícios usados, desde a transformação de base, até o cálculo da potência complexa instantânea a partir da base $\alpha\beta$ chega a um ponto em que é possível separar o montante em duas componentes de potência, p e q.

$$s = p + \mathbf{j}q \tag{2.28}$$

Sendo que p é considerado como a potência ativa instantânea medida através das componentes $\alpha\beta$ e q e denominado de potência reativa instantânea, dado pelas equações 2.29 e 2.30, respectivamente.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \tag{2.29}$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta \tag{2.30}$$

Devido a característica das equações, contendo duas variáveis de corrente e duas de tensão para o cálculo tanto de p, quando de q pode-se então considerar um sistema matricial, da forma:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.31}$$

De forma geral, as duas parcelas de potência encontradas a partir da equação 2.31 apresentam termos médios e termos oscilatórios que definem os perfis que as potências irão exibir.

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \tag{2.32}$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \tag{2.33}$$

A parcela média da potência estará presente nos cálculos sempre que houver fluxo de potência ativa entre carga e fonte, e sua parcela oscilatória se dá na presença de distorção harmônica. Para a potência reativa, seu valor médio mostra o montante de Potência Reativa responsável pelo Deslocamento e sua parcela oscilatória, como na potência ativa, existe caso haja distorção no sistema.

O sistema linear de equações propõe a oportunidade de definir a função inversa que será expressa em função das tensões $\alpha\beta$ e das potências ativa e reativa instantâneas, segundo:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{2.34}$$

Diante desse equacionamento, e principalmente com a equação 2.34, é possível a partir de valores de potências, obter as correntes circulantes que geram as respectivas potências. A matriz pode ser desacoplada gerando assim parcelas de correntes em cada eixo ($\alpha\beta$) em relação a cada parcela de potência p e q.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \tag{2.35}$$

Claramente pode-se então interpretar a forma matricial como um conjunto de duas equações para i_α e para i_β.

$$i_\alpha = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p + \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \tag{2.36}$$

$$i_\beta = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p - \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \tag{2.37}$$

Assim então estão descritas 4 parcelas de correntes instantâneas para cada eixo com respeito a cada parcela de potência:

- $i_{\alpha p}$: corrente ativa instantânea no eixo α

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \tag{2.38}$$

- $i_{\alpha q}$: corrente reativa instantânea no eixo α

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \tag{2.39}$$

- $i_{\beta p}$: corrente ativa instantânea no eixo β

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p \tag{2.40}$$

- $i_{\beta q}$: corrente reativa instantânea no eixo β

$$i_{\beta q} = -\frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q \tag{2.41}$$

Portanto, usando o conceito de decompor as potências instantâneas em valores médios e oscilatórios, como visto nas equações 2.32 e 2.33, é possível definir as parcelas de corrente que então parecem representar fenômenos diferentes.

$$i_\alpha = i_{\alpha\bar{p}} + i_{\alpha\tilde{p}} + i_{\alpha\bar{q}} + i_{\alpha\tilde{q}} \tag{2.42}$$

$$i_\beta = i_{\beta\bar{p}} + i_{\beta\tilde{p}} + i_{\beta\bar{q}} + i_{\beta\tilde{q}} \tag{2.43}$$

Esse problema pode ser visualizado também na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha\bar{p}} \\ i_{\beta\bar{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha\tilde{p}} \\ i_{\beta\tilde{p}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha\bar{q}} \\ i_{\beta\bar{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha\tilde{q}} \\ i_{\beta\tilde{q}} \end{bmatrix} \tag{2.44}$$

Considerando a linearidade da Transformada de Clarke, ao se realizar a transformada inversa (equações 2.22 e 2.23) para obter os valores no eixo de coordenadas *abc*, os mesmos termos de potência se aplicam. Podendo assim fazer uma breve discussão acerca de onde os fenômenos estão presentas, e de que forma eles são observados nos sinais de potência instantânea.

Pode-se definir as parcelas de correntes no eixo de coordenadas *abc*, como:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{a\bar{p}} \\ i_{b\bar{p}} \\ i_{c\bar{p}} \end{bmatrix}_A + \begin{bmatrix} i_{a\tilde{p}} \\ i_{b\tilde{p}} \\ i_{c\tilde{p}} \end{bmatrix}_B + \begin{bmatrix} i_{a\bar{q}} \\ i_{b\bar{q}} \\ i_{c\bar{q}} \end{bmatrix}_C + \begin{bmatrix} i_{a\tilde{q}} \\ i_{b\tilde{q}} \\ i_{c\tilde{q}} \end{bmatrix}_D \tag{2.45}$$

Cada parcela de corrente é indicada por um índice para compreensão de onde os fenômenos se mostram.

O termo com índice A definem as correntes nas coordenadas *abc* que são proporcionais ao valor médio da potência ativa instantânea, logo a potência ativa total (P). O termo com índice C define as correntes proporcionais ao valor médio da potência reativa instantânea, assim já é sabido que esse montante representa o total de deslocamento angular entre tensão e corrente fundamentais. Por fim a distorção harmônica é vista juntamente nos termos B e D da equação 2.45.

2.7 Filtro Ativo

A tempos são usadas diferentes tipos de técnicas para filtragem de sinais, tanto de corrente, quanto para tensão. A filtragem se dá a fim de atenuar indesejáveis comportamentos de parâmetro relacionados ao sistema elétrico, sendo essas técnicas divididas em duas classes:

- Filtro Passivo
- Filtro Ativo

Os chamados Filtros Passivos são compostos por elementos passivos do sistema elétrico, como capacitores e indutores, aproveitando suas características quando o sinal aplicado aos componentes tem comportamento variável durante o tempo, criando assim uma baixa impedância para frequências harmônicas (MIKKILI; PANDA, 2016). Porém devido a baixa flexibilidade perante a variações que podem ocorrer no sistema de distribuição, é possível que haja a necessidade de projeto de filtros específicos para cada faixa de frequência que deseja atenuar. A associação, em série ou paralelo, desses tipos de filtro para a maior abrangência de atuação pode causar problemas se caso os parâmetros da rede e da carga não forem especificados corretamente, como ressonância ou problemas de regulação de tensão.

Já a classe de Filtro Ativo tomou seu lugar nas aplicações para sistemas de potência com o advento dos dispositivos semicondutores. Os estudos relacionados ao ramo da Eletrônica de Potência viabilizaram, cada vez mais, a criação de dispositivos que não possuem comportamento puramente senoidal quando analisadas suas variáveis elétricas, caracterizando assim as cargas não lineares. O problemas da qualidade de energia elétrica, então, passaram a tomar maiores proporções e assim o aprimoramento de técnicas de filtragem se tornaram necessárias. A Figura 14 mostra as formas encontradas para esse aprimoramento da filtragem.

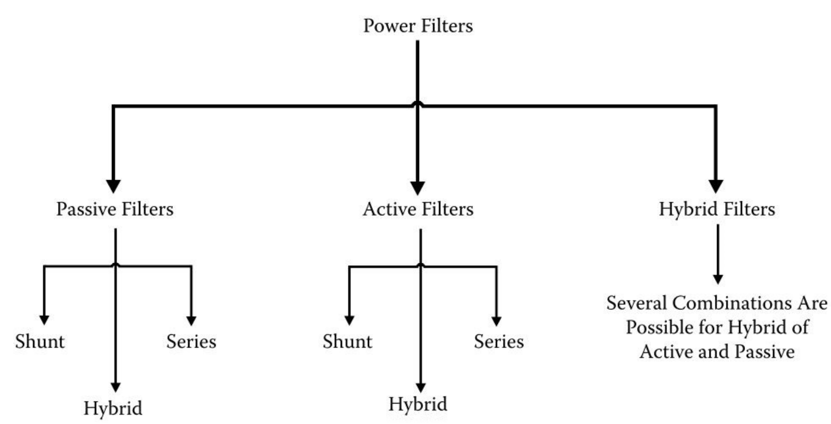

Figura 14 – Tipos de Técnicas de Filtragem de sinais elétricos - Fonte: (MIKKILI; PANDA, 2016)

Através da associação de diferentes topologias de filtros, série e paralelo, os chamados filtros híbridos, as características foram otimizadas e ainda a junção entre as duas classes de filtros, Ativos e Passivos, também se mostraram como uma boa saída para a redução das componentes harmônicas no sistema.

Neste trabalho o filtro estudado faz parte da classe de Filtro Ativo, mais especificamente o em conexão em paralelo (*shunt*, em inglês) com a rede devido a presença de harmônicos consideráveis no sinal de corrente. O filtro se trata de um conversor do tipo CC/CA trifásico, contendo a representação de um capacitor no lado de corrente contínua para mostrar que deve haver uma tensão estabelecida para que funcione. A Figura 15 apresenta um modelo da forma como o filtro se conecta ao sistema de distribuição trifásico com carga, os terminais do lado CA são ligados ao PAC e possuem um valor de indutância a fim de minimizar a variação da corrente nas linhas do mesmo.

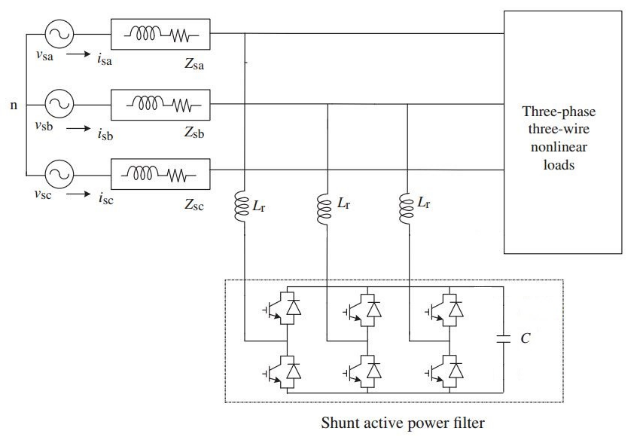

Figura 15 – Conexão do FAP em paralelo ao PAC - Adaptado de: (SINGH; CHANDRA; AL-HADDAD, 2015)

A técnica desenvolvida anteriormente, já havia sido estudada desde o começo do século XX porém formas de controlar os parâmetros impediam que fosse aplicado experimentalmente e por consequência não era comercial. Porém, hoje em dia, com o vasto número de unidades de processamento e também de dispositivos semicondutores, o FAP tem seu momento de evolução.

A partir da definição da Transformada de Clarke e então o cálculo das potências existentes, as equações 2.32 e 2.33 definem que para qualquer sinal de tensão e corrente trifásicos os valores das potências podem ser representados por parcelas médias e oscilatórias. Nesta abordagem, a presença de um valor médio na potência ativa mostra que existe um fluxo de potência ativa no sistema e valor médio na potência reativa explicita que há uma defasamento angular entre componentes fundamentais de tensão e corrente. As parcelas oscilatórias, quando presentes, identificam o sistema como distorcido, ou seja, a tensão ou corrente não tem o perfil puramente senoidal.

Então, para todos os casos, os fluxos de potência que não o fluxo ativo não são desejados, necessitando assim de uma técnica de filtragem. Portanto é necessário que a potência reativa instantânea calculada e a parcela oscilatória da potência ativa instantânea

($\tilde{p}$) sejam escolhidas como as potências a serem compensadas pelo FAP.

$$p_c^* = -\tilde{p} \tag{2.46}$$

$$q_c^* = -\bar{q} - \tilde{q} \tag{2.47}$$

Na qual o subscrito c indica como sendo a potência s ser compensada.

Assim, tendo em posse os valores das tensões v_α e v_β, além de ter selecionado as parcelas das potências a serem compensadas, a equação 2.35 obtém os valores das correntes na base $\alpha\beta$ que geram as potências não desejadas em contra fase com as absorvidas pela carga conectada ao sistema.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_c^* \\ q_c^* \end{bmatrix} \tag{2.48}$$

Os sinais de referência calculados na base $\alpha\beta$ então são transformados para base ABC, e assim podem servir como entrada para o controle por Histerese acionar os componentes semicondutores do FAP.

$$\begin{bmatrix} i_{Ca}^* \\ i_{Cb}^* \\ i_{Cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha^* \\ i_\beta^* \end{bmatrix} \tag{2.49}$$

O fluxo de sinais que são definidos até que, por fim, o sinal de referência para as correntes de linha sejam obtidos é mostrado na Figura 16 para o FAP conectado em paralelo.

É importante frisar que não necessariamente as parcelas de potências selecionadas para compensação são as ditas anteriormente, pode haver compensações parciais dos termos. O resultado da compensação parcial será apresentado no capítulo 4.

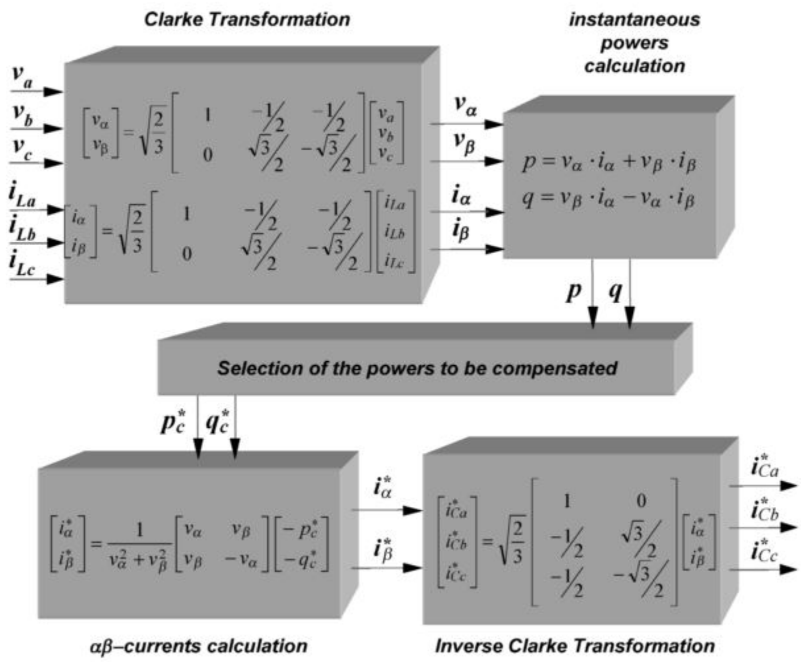

Figura 16 – Diagrama de Controle de corrente para o FAP tipo Shunt - Fonte: (AKAGI, 2007)

3 Descrição do Sistema

A partir do software *PSIM* é possível simular o fluxo de potência entre fonte e carga, e com a conexão do FAP em paralelo com a fonte pode-se analisar a resposta temporal do sistema. A simulação possui os seguintes componentes relacionados com o sistema de potência:

- Rede: caracteriza o sistema elétrico de potência, ou barramento infinito.
- Carga não linear: carga conectada a rede que drena uma corrente distorcida.
- Filtro Ativo de Potência: dispositivo destinado a compensar a potência reativa, atenuando o ângulo de defasamento entre corrente e tensão e as correntes harmônicas.

Para realizar o controle das correntes de compensação geradas pelo FAP, é necessário um bloco que realize o cálculo das correntes de compensação e outro que acione os dispositivos semicondutores de forma ordenada.

- Cálculo das correntes de compensação
- Controle por Histerese

3.1 Rede

O sistema usado para simular o comportamento da rede de distribuição é um sistema de baixa tensão que apresenta uma baixa reatância série para que melhor represente um barramento infinito.

Toda análise e atuação do FAP é feita para que entre a rede de distribuição e as cargas conectadas ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) haja um controle do fluxo de potência ativa (p) e reativa (q).

As correntes de linha que circulam pelas três fases do sistema são medidas para que posteriormente seja feito o cálculo da potência instantânea.

Tabela 1 – Sistema Trifásico

Especificação	Valor
V_{linha}	220 V
f_1	60Hz
L_s	$\cong 0$

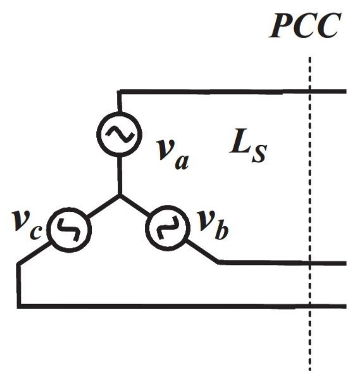

Figura 17 – Componente do sistema que representa a rede de distribuição - Fonte: (AKAGI, 2007)

3.2 Cargas

Para que o sistema de compensação tenha propósito, é necessário reproduzir formas de ondas de corrente que criem montantes de potência reativa vista pela fonte, e que tenham perfis diferentes. Serão utilizados quatro tipos de cargas trifásicas que possam mostrar perfis diferentes de corrente:

1. Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RC paralelo
2. Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série
3. Retificador trifásico controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série
4. Carga trifásica RL série

As especificações dos componentes passivos conectados a todas as cargas foram dimensionados para consumirem o mesmo valor de potência ativa de 5 kW.

3.2.1 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série

Esse tipo de perfil de carga é visto principalmente no acionamento de motores CC, na qual é comumente modelado como uma fonte de corrente imposta (CSI, em inglês).

A carga conectada no barramento CC do conversor tem as seguintes especificações:

- $L = 10\ mH$
- $R = 17,2\ \Omega$

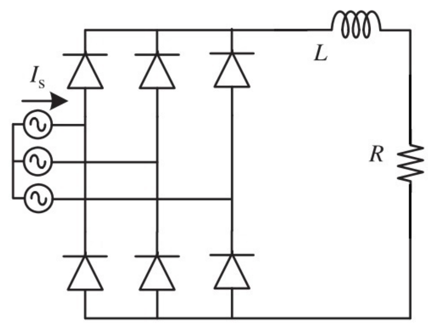

Figura 18 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015)

O conversor absorve, por fase, uma corrente como mostrado na Figura 11. Dessa forma o FAP deve ter a habilidade de atenuar a amplitude da maioria dos componentes harmônicos presentes neste perfil de sinal de corrente, visto que o sinal de tensão medido no PAC não apresenta distorção harmônica.

3.2.2 Retificador não controlado trifásico tipo Ponte de Graetz, com carga RC paralelo

O perfil de corrente para o retificador trifásico com carga RC é visualizado de maneira vasta nos sistemas de potência, bem como para acionamento de motores de indução trifásicos. Também pode ser modelado como uma fonte de tensão imposta(VSI, em inglês).

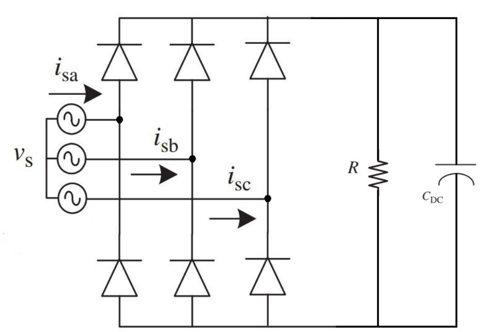

Figura 19 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015)

A carga conectada no barramento CC do conversor tem as seguintes especificações:

- $C = 250\ \mu F$
- $R = 18,3\ \Omega$

3.2.3 Retificador controlado trifásico tipo Ponte de Graetz, com carga RL série

Para a inserção de defasamento angular entre as componentes fundamentais de tensão e corrente o retificador controlado é usado neste caso, a forma de onda da corrente será a mesma que a do retificador não controlado, porém haverá um atraso nas conduções dos SCRs gerando assim Potência Reativa de Deslocamento.

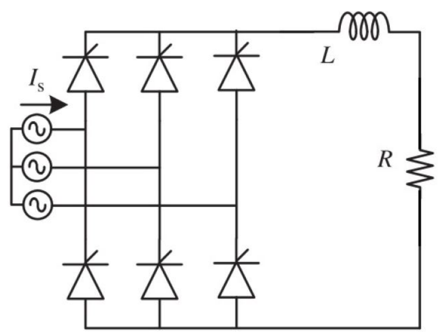

Figura 20 – Modelo do conversor - Adaptado de: (EMADI; NASIRI; BEKIAROV, 2015)

A carga conectada no barramento CC do conversor tem as seguintes especificações:

- $L = 5\ mH$
- $R = 9,5\ \Omega$
- $\alpha = 60^{o}$

3.2.4 Carga trifásica RL série

A carga linear que será analisada será uma carga trifásica do tipo RL série, assim será possível visualizar o comportamento das potências quando não há distorção harmônica para que fique mais fácil saber quais problemas mais influenciam em quais parcelas das potências.

A carga trifásica tem as seguintes especificações:

- $L = 10\ mH$
- $R = 8\ \Omega$

3.3 Filtro Ativo em conexão paralelo

O elemento do sistema que irá compensar os componentes harmônicos provindo da carga não linear é o Filtro Ativo de Potência. O FAP é um conversor trifásico do tipo CC/CA que tem seus semicondutores acionados a partir de sinais de referência criados a fim de compensar correntes harmônicas.

No barramento CC do filtro ativo foi colocado um capacitor de $4,7\ \mu F$ a fim de garantir um nível de tensão que não seja imposto através de uma fonte independente. Assim, realizando a medida da tensão no capacitor, pode-se visualizar se está havendo troca de potência ativa, mesma que pouca, caso a tensão tenha alterações durante a ação do filtro ativo.

O dispositivos semicondutores usados na simulação foram chaves IGBTs, devido a sua versatilidade e possibilidade de acionamento em altas frequências. Como o controle usado neste trabalho foi por Histerese, a frequência de chaveamento acaba que se torna variável, dependendo da banda escolhida para os sinais de referência e dos níveis de corrente circulantes no circuito.

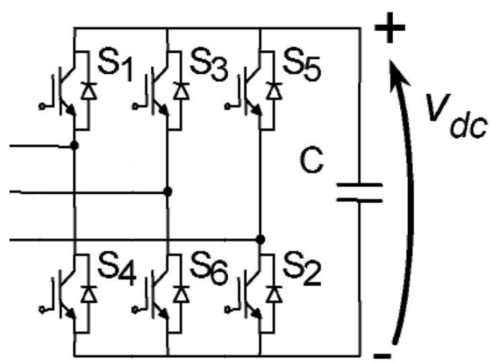

Figura 21 – Filtro Ativo de Potência - Fonte: (AKAGI, 2007)

Neste caso, os IGBTs $S1$ e $S4$ estão dispostos para a fase A do sistema trifásico, $S3$ e $S6$ para a fase B e as chaves $S5$ e $S2$ são para a fase C. O valor, por fase, das indutância conectadas na saída do filtro ativo são de $1\ mH$.

3.4 Cálculo das correntes de compensação

Usando a Teoria da Potência Instantânea, a partir das tensões de fase medidas no PAC e as correntes de linha que estão sendo absorvidas pelas cargas, na base ABC, o código escrito no *CBlock* transforma as variáveis para a base $\alpha\beta$ e calcula a potência ativa (p) e reativa (q) instantânea vista pela rede.

A partir das equações 2.29 e 2.30, os valores das potências são calculados e assim é possível selecionar quais termos (médio ou oscilatório) de cada potência deseja-se atenuar. No caso o sistema foi programado para minimizar toda a potência reativa (q) e a parcela oscilatória da potência ativa ($\tilde{p}$) que a fonte troca com as cargas.

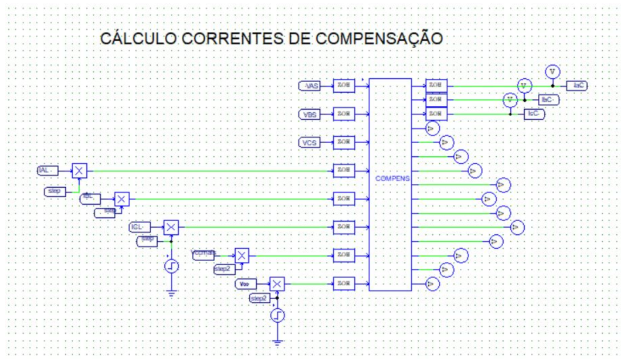

Figura 22 – Cálculo das correntes de compensação

O *CBlock* usado, desempenha o papel do processador para realização dos cálculos necessários para criar, de forma satisfatória, correntes de linha no FAP que compensem correntes harmônicas provindas das cargas conectadas ao sistema. Primeiro, o bloco denominado *COMPENS*, calcula os valores das potências p e q através da teoria e equações desenvolvidas no capítulo 2. De posse dos valores de tensões e correntes na base ABC, o código calcula os valores das tensões e corrente na base $\alpha\beta$ e então define os valores instantâneos das potências. O bloco funcional *ZOH (Zero-order Hold)* configura a frequência de amostragem para 20 kHz.

Para a separação das componentes médias e oscilatórias das potências, visto nas equações 2.32 e 2.33, foi usado um filtro passa-baixas digital que foi projetado a partir do próprio PSIM considerando a seguinte função de transferência para o filtro.

$$H(s) = k\frac{1}{1 + T_p s} \tag{3.1}$$

Onde o ganho k é definido como 1 a fim de não mudar as amplitudes de saída do filtro e T_p é proporcional a frequência de corte do filtro, no caso $20Hz$. Assim a discretização através do método de Euler regressivo define a seguinte função de transferência discretizada:

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1 z^{-1}}{1 + a_0 z^{-1}} = \frac{Y(z)}{X(z)} \tag{3.2}$$

Com os valores dos coeficientes b_0, b_1, a_0, a_0 são calculadas pelo PSIM e a equação a diferenças obtidas a partir dessa função de transferência é da forma:

$$y[k] = b_0x[k] + b_1x[k-1] - a_0y[k-1] = 0,0002x[k] - 0,9998y[k-1] \tag{3.3}$$

Em seguida, a partir dos valores de tensões na base $\alpha\beta$ e as parcelas das potências que serão compensadas, no caso, $\tilde{p}$ e q o algoritmo calcula as correntes necessárias para que as potências escolhidas circulem. E por fim, a partir da Transformada Inversa de Clarke são obtidos os sinais de referência na base ABC, estes que sim serão os usados como referência para o controlador de corrente.

```
Va = in[0];
Vb = in[1];
Vc = in[2];
Ia = in[3];
Ib = in[4];
Ic = in[5];
Vref = in[6];
Vcc = in[7];

Vo = ( (Va)*(1/sqrt(2)) + (Vb)*(1/sqrt(2)) + (Vc)*(1/sqrt(2)) )*0.8165;
Valpha = (Va - 0.5*Vb - 0.5*Vc)*0.8165;
Vbeta = ((sqrt(3)/2)*Vb - (sqrt(3)/2)*Vc)*0.8165;

Io = ( (Ia)*(1/sqrt(2)) + (Ib)*(1/sqrt(2)) + (Ic)*(1/sqrt(2)) )*0.8165;
Ialpha = (Ia - 0.5*Ib - 0.5*Ic)*0.8165;
Ibeta = (0.866*Ib - 0.866*Ic)*0.8165;

P = Valpha*Ialpha + Vbeta*Ibeta + Vo*Io;
Q = Valpha*Ibeta - Vbeta*Ialpha;

Pmedio = 0.002*P + 0.998*Pantes;
Pantes = Pmedio;
Posc = P - Pantes;

Qmedio = 0.002*Qo + 0.998*Qantes;
Qantes = Qmedio;
Qosc = Qo - Qantes;

Vcc2 = Vcc*Vcc;
```

```
Vref2 = Vref*Vref;

erro = Vref2 - Vcc2;
somaerro = somaerro + erro;
diferro = erro - erroant;

propVcc = Kp*erro;
intVcc = Ki*somaerro;
derVcc = -Kd*diferro;

erroant = erro;

Ploss = propVcc + intVcc + derVcc;

Pcompen= -Posc  + Ploss;
Qcompen =  -Q;

k = 1/(Valpha*Valpha + Vbeta*Vbeta + Vo*Vo);

IalphaC = k*(Valpha*Pcompen + Vo*Qbetacompen - Vbeta*Qocompen);
IbetaC = k*(Vbeta*Pcompen - Vo*Qalphacompen + Valpha*Qocompen);
IoC = k*(Vo*Pcompen + Vbeta*Qalphacompen - Valpha*Qbetacompen);

IaC = 0.8165*(IoC/sqrt(2) + IalphaC);
IbC = 0.8165*(IoC/sqrt(2) + (-0.5)*IalphaC + (sqrt(3)/2)*IbetaC);
IcC = 0.8165*(IoC/sqrt(2) + (-0.5)*IalphaC - (sqrt(3)/2)*IbetaC);

out[0]=IaC;
out[1]=IbC;
out[2]=IcC;
out[3]=P;
out[4]=Posc;
out[5]=Q;
out[6]=Qosc;
out[7]=Valpha;
out[8]=Vbeta;
out[9]=Ialpha;
out[10]=Ibeta;
```

3.5 Controle por Histerese

O tipo de controle escolhido para acionar os IBGTs é o Controle por Histerese devido a sua robustez e facilidade de aplcação. Os sinais de corrente de referência são usados para criar a banda que as correntes medidas nas linhas devem seguir que é modelado a partir da equação 3.4 e 3.5 sendo que i_c^* é a corrente de compensação calculada.

$$i_{máx} = i_c^* + \Delta IL \tag{3.4}$$

$$i_{mín} = i_c^* - \Delta IL \tag{3.5}$$

O valor da banda em que o sinal fica confinado é definido de acordo com a precisão que pode ser atuada no sistema. O ΔIL na simulação foi escolhido a partir do valor médio de corrente absorvido pela carga, sendo que:

$$\Delta IL = 0.75A \tag{3.6}$$

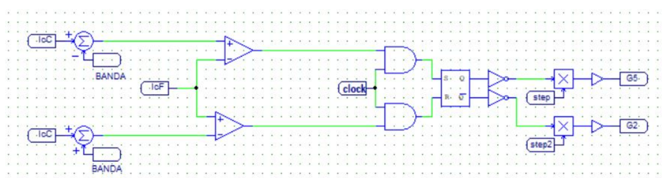

Figura 23 – Controle por histerese

A Figura 24 representa como as bandas criadas a partir do sinal de referência funcionam. O sinal de referência i_c^* (meio) é somada ao ΔIL gerando assim a banda superior (acima), e subtraída criando a banda inferior (abaixo). A comparação entre o sinal medido na linha do FAP é comparado com as bandas de compensação e o resultado é armazenado em um latch tipo RS e assim o respectivo sinal pode ser aplicado no gate do IGBT de cada fase.

Para que exista um limite na frequência de ca

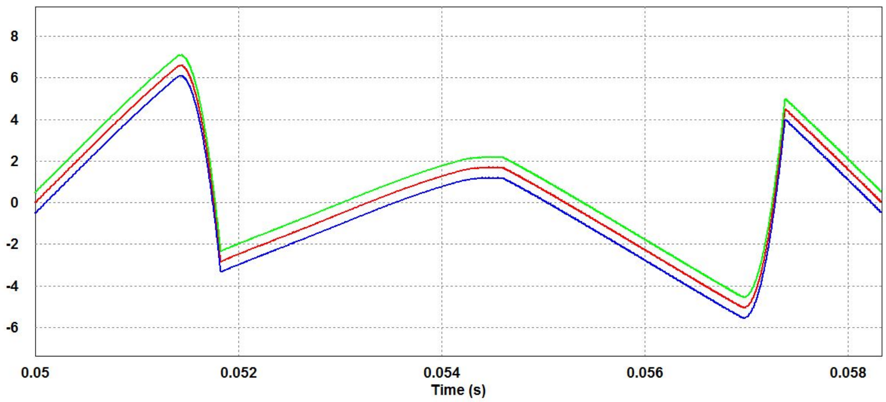

Figura 24 – Exemplo de obtenção das bandas de histerese.

3.6 Controle Barramento CC - FAP

Para que o FAP trabalhe de forma eficaz é necessário que a tensão no barramento CC seja constante, então dessa forma não há fluxo de potência ativa entre o FAP e o sistema que ele está conectado. A maneira de se realizar isto é implementando um controlador PI que fará a mensuração do valor de tensão no barramento CC e, se sintonizado corretamente, pode estabilizar o nível de tensão em um valor desejado.

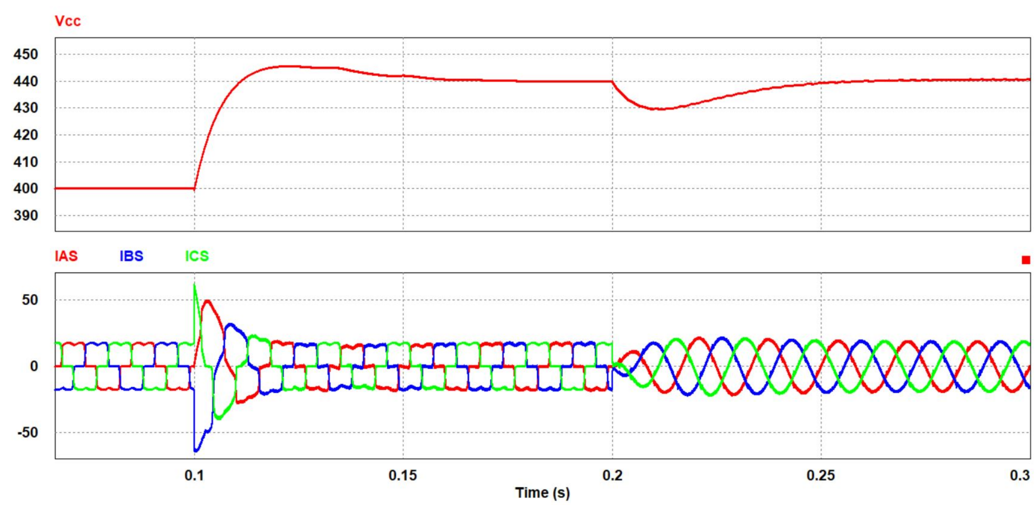

Figura 25 – Gráfico 1: Tensão no barramento CC do FAP. / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte.

Para a compensação do efeito de variação na tensão do barramento foi levantada primeiramente a equação que descreve o fluxo de potência ativa nos terminais do capacitor, (FOGLI et al., 2015). Assumindo assim que a soma da potência ativa nos terminais do capacitor (P_{CAP}) com a potência ativa (P_g) que flui pelos terminais do conversor seja nula, então:

$$P_{CAP} + p_g = \frac{1}{2} C_{eq} \frac{d(V_{CC}^2)}{dt} + p_g = 0 \tag{3.7}$$

Na qual C_{eq} é a capacitância equivalente do FAP e V_{CC} é a tensão do barramento.

Usando o valor quadrático da tensão é possível reescrever a equação, após linearização, no domínio da frequência para então ter em mãos um modelo controlável da tensão CC, por 3.8:

$$\frac{V_{CC}^2}{p_g} = -(\frac{2}{sC_{eq}}) \tag{3.8}$$

A partir dessa equação para o comportamento da tensão no capacitor é possível realizar um controle PID em malha fechada, do tipo mostrado na Figura 26.

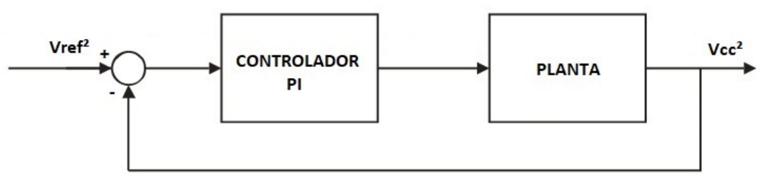

Figura 26 – Malha de controle para tensão do barramento CC - FAP

Em que tem-se:

- Controlador PI:

$$PI(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \tag{3.9}$$

- Planta:

$$G(s) = -\frac{2}{sC_{eq}} \tag{3.10}$$

Para a malha fechada, a função de transferência se resume a:

$$H(s) = \frac{PI(s)G(s)}{1 + PI(s)G(s)} = \frac{(\frac{2K_p}{C_{eq}})s + (\frac{2K_i}{C_{eq}})}{s^2 + (\frac{2K_p}{C_{eq}})s + (\frac{2K_i}{C_eq})} \tag{3.11}$$

Tendo a função de transferência em malha fechada com o controlador PI $C(s) = \frac{2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2}$ é possível chegar então nos valores para os ganhos K_p e K_i para o controlador PID.

$$K_p = C_{eq}\zeta\omega_n = 0.4 \tag{3.12}$$

$$K_i = \frac{C_{eq}\omega_n^2}{2} = 0.000925 \tag{3.13}$$

4 Resultados

Devido a característica balanceada da rede de distribuição analisada, todas as formas de onda apresentadas conterão os sinais trifásicos. Ou seja, para melhor visualização, sempre que necessário, os sinais de tensão estarão presentes para servir como referência.

4.1 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série

Devido a carga não linear conectada ao sistema de distribuição (conversor CA/CC trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz com carga RL), as correntes de linha geradas pela fonte tem uma característica não senoidal. Os sinais de correntes e tensões trifásicos são mostrados na Figura 27 e a tensão se mostra como sendo um sinal puramente senoidal, e as correntes apresentam distorção harmônica. A carga não linear impõe um THD de pouco mais de 25% nas correntes de linha que o sistema de distribuição fornece ao PAC, a conexão do FAP ao PAC deseja atenuar os componentes harmônicos contidos no sinal de corrente, abaixando o valor do THD. Além de compensar o deslocamento angular entre tensão e corrente gerado a partir das indutâncias de entrada do conversor.

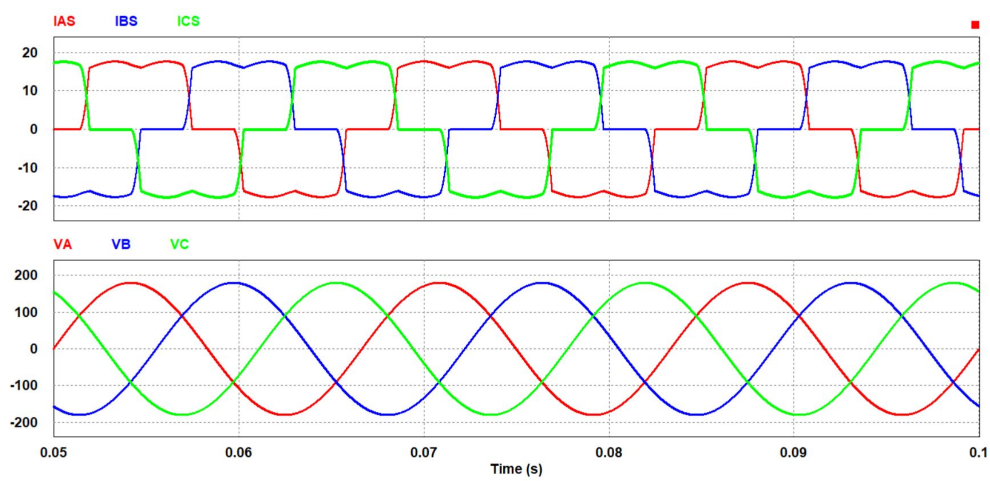

Figura 27 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

Os valores das amplitudes de cada componente harmônica pode ser obtido a partir do cálculo da Transformada de Fourier. O PSIM disponibiliza na aba de visualização das ondas o cálculo da Transformada Rápida de Fourier (FFT), assim todas as análises podem ser feitas no domínio do tempo e da frequência.

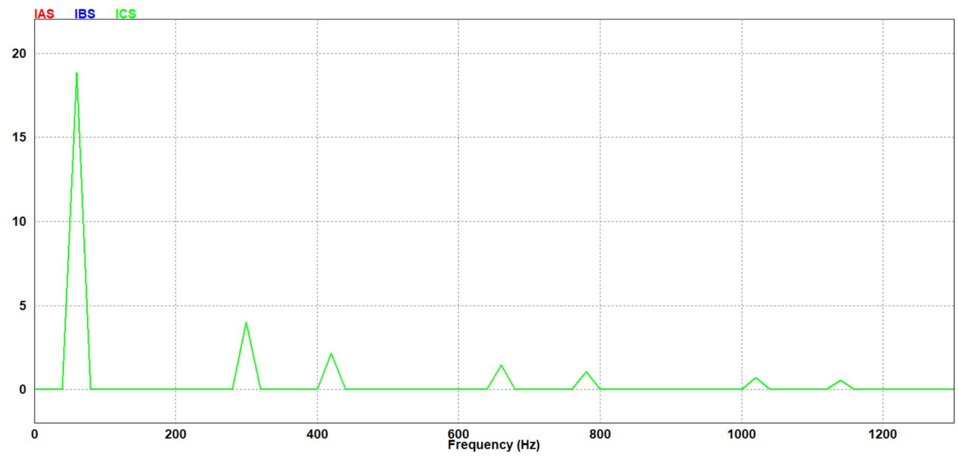

Figura 28 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente antes da compensação.

Segundo a Figura 28, as componentes harmônicas pares e múltiplas de três são ausentes do sinal. A tabela a seguir mostra as amplitudes das harmônicas presentes, incluindo o valores de Distorção Harmônica Individual (IHD) que é calculado a partir da razão entre a amplitude da harmônica em análise e a componente fundamental do sinal.

Tabela 2 – Amplitudes I_n e IHD_n para o sinal de corrente da fase A, para o retificador não controlado com carga RL

	I_n [A]	IHD_n %
1^o	18,70	100
5^o	3,98	21,2
7^o	2,34	12,5
11^o	1,62	8,6
13^o	1,28	6,8
17^o	1,00	5,3
19^o	0,85	4,5

Na análise foram desconsiderados os harmônicos de maior ordem, pois estes já possuíam amplitudes muito inferiores a amplitude fundamental.

Após as medições das tensões de fase no PAC e das correntes de linha absorvidas pela carga, o algoritmo contido no *CBlock COMPENS* realiza as Transformadas de Clarke para tensão e corrente, e assim calcula as parcelas de potência ativa (p) e reativa (q) instantâneas que compreendem a Figura 29.

Como esperado a potência ativa instantânea apresenta um valor médio diferente de zero devido a presença de fluxo de potência ativa da fonte para o conversor, e uma parcela oscilatória devido a distorção harmônica. A potência reativa instantânea possui um valor médio devido a presença de indutâncias de linha e na entrada do conversor, pois não era esperado um deslocamento entre tensão e corrente provocado pelo conversor não

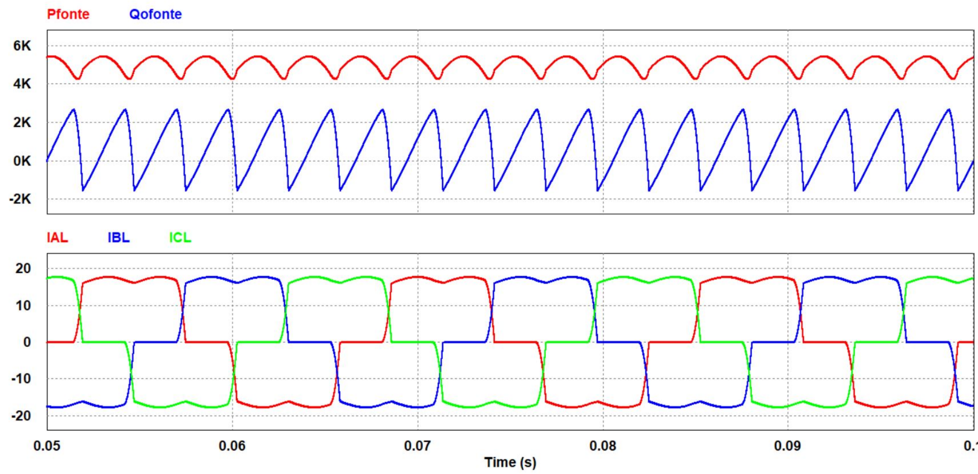

Figura 29 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas.

controlado.

A partir dos valores de potências calculados, deseja-se que toda a parcela de potência reativa seja compensada, além da parcela oscilatória da potência ativa instantânea. Isso se dará calculando as correntes de compensação i^*_{Cn}, de acordo com a equação 2.49, selecionando as potências a serem compensadas juntamente com as tensões na base $\alpha\beta$.

Os sinais de compensação são compostos com todas as componentes harmônicas existentes no sinal da carga, incluindo uma parcela fundamental para correção da potência reativa relacionada com o deslocamento. A Figura 30 mostra o sinais de referência do sistema (Gráfico 1) para 3 ciclos de tensão (Gráfico 2).

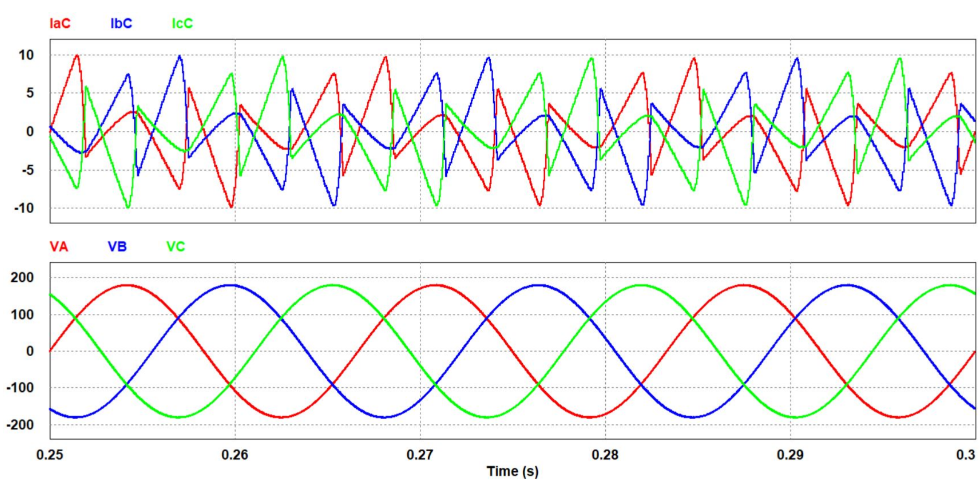

Figura 30 – Gráfico 1: Sinais de referência calculado para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas

Este sinal de referência será então acrescentado e subtraído do valor de ΔIL

escolhido, criando assim a banda de sinal controlado por histerese. Dessa forma o sinal de corrente no FAP ficará confinado entre as bandas e apresentará um perfil chaveado quando visto em um intervalo pequeno de tempo, como na Figura 31.

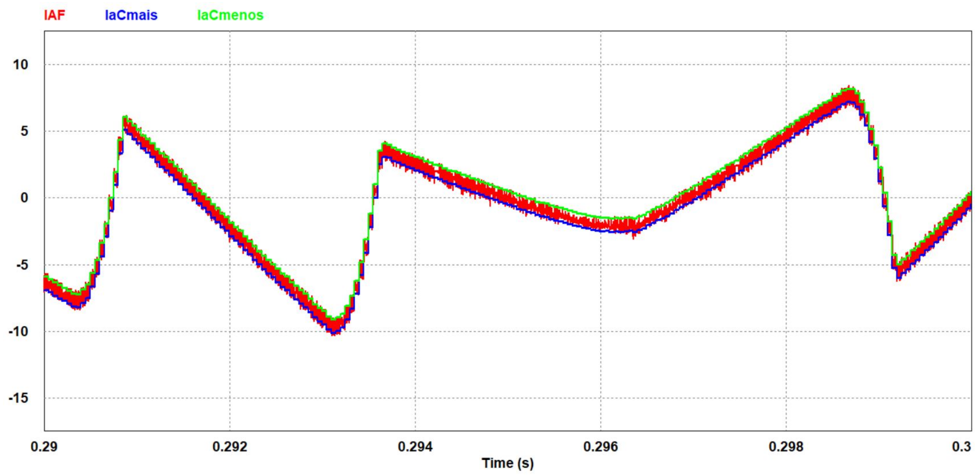

Figura 31 – Banda superior e inferior limitando a corrente de saída do FAP para fase A.

Até o $t = 0,1s$ o sistema opera de forma natural e a fonte gera toda a corrente que a carga demanda, incluindo as parcelas de potências não ativas, como visto na Figura 27.

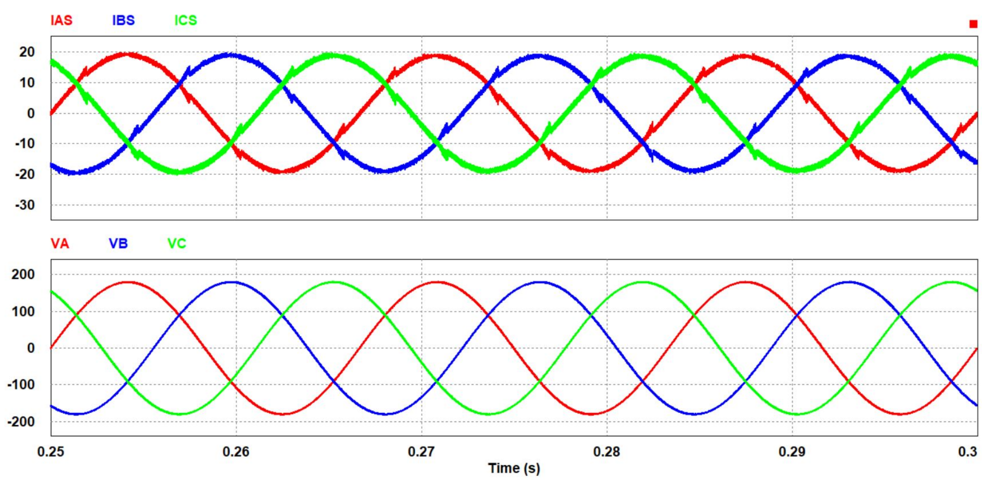

Figura 32 – Gráfico 1: Correntes trifásicas drenadas pela fonte / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

A partir de $t = 0,1s$ o sistema de compensação se restringe a corrigir o valor de tensão no barramento CC do FAP. E então em $t = 0,2s$ o FAP passa a injetar as potências necessárias para que os objetivos de compensação fossem alcançados.

Como esperado, o perfil senoidal da corrente faz com que a rede de distribuição perceba apenas um fluxo de potência ativa. O perfil senoidal pode ser comprovado a partir do cálculo da FFT dos sinais de corrente trifásicos após o acionamento do FAP,

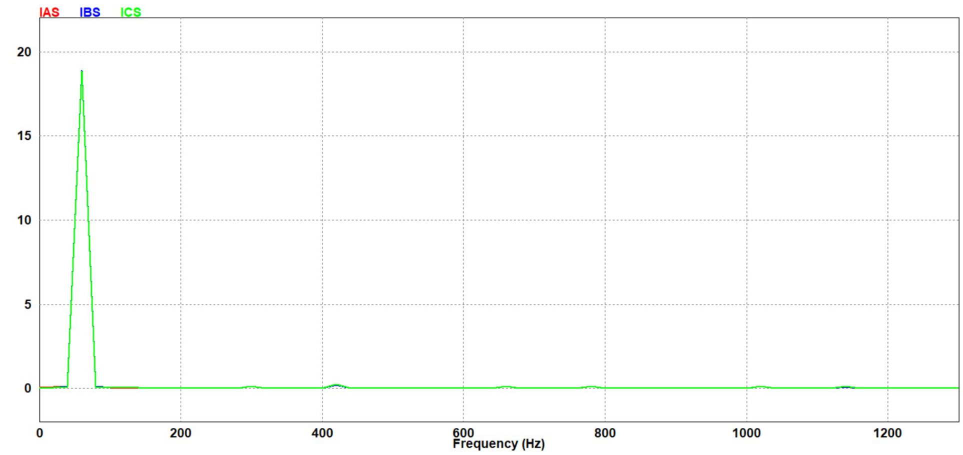

Figura 33 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento.

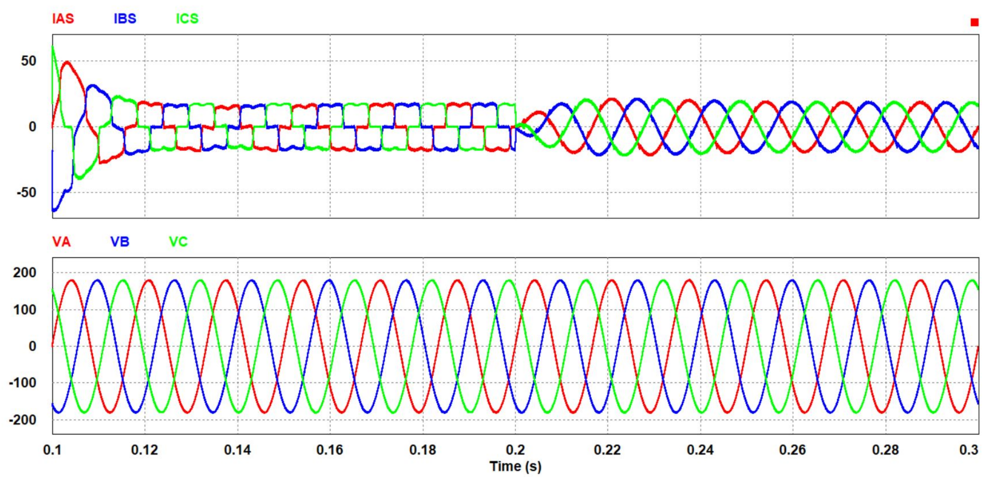

Figura 34 – Resposta do FAP.

as amplitudes das componentes harmônicas praticamente são nulas comparadas com as vistas quando o filtro não estava operando, vide Figura 33.

O comportamento das potências estão dispostos na Figura 35, na qual é possível perceber que, apesar de haver uma oscilação de alta frequência em seus valores, a parcela oscilatória da potência ativa e reativa é praticamente toda atenuada, a parcela média da potência reativa é praticamente nula e o valor médio da potência ativa se mantém.

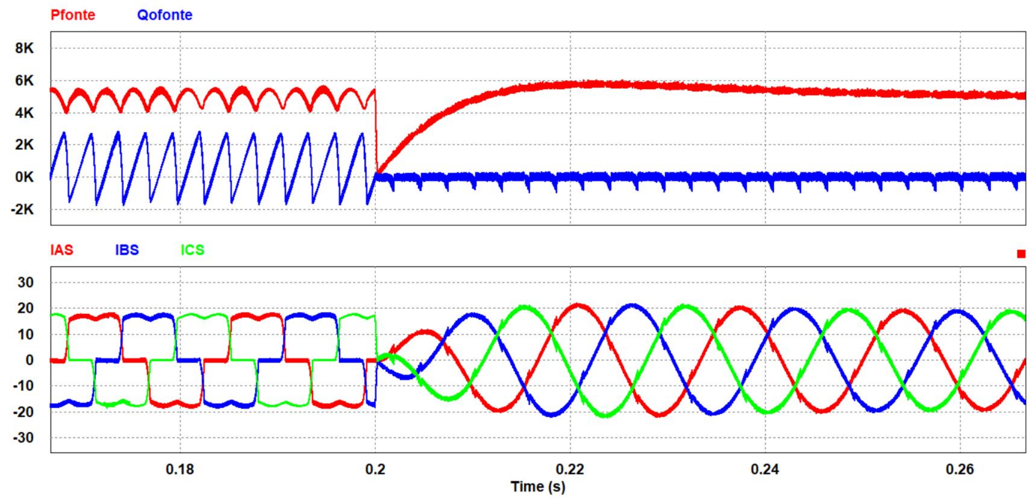

Figura 35 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte.

Tabela 3 – Parâmetros do sistema, para o retificador não controlado com carga RL

	Sem Compensação	Compensação
V	127 V	127 V
I	13,78 A	13,35 A
THD_i	26,7 %	3,7 %
P	5,02 kW	5,08 kW
S	5,25 kVA	5,09 kVA
FP	0,956	0,998

4.2 Retificador trifásico não controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RC paralelo

O modo retificador observado neste caso é do tipo VSI, na qual o sistema de distribuição transfere corrente com o retificador a fim de manter o valor de tensão sobre o capacitor no lado CC do conversor. O perfil da onda de corrente desse conversor está exibido na Figura 36 e possui um alto valor de distorção harmônica total visto que se difere muito de um sinal puramente senoidal.

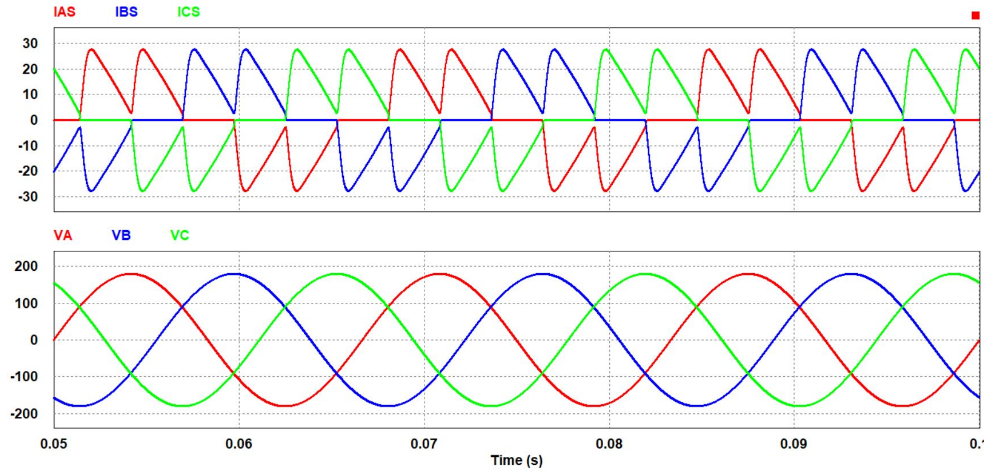

Figura 36 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

O retificador, neste caso, impõe ao sinal de corrente um valor de $THD \widetilde{=} 55\%$, havendo assim uma parcela considerável de correntes harmônicas no sistema. A FFT do sinal de corrente está mostrado na Figura 37.

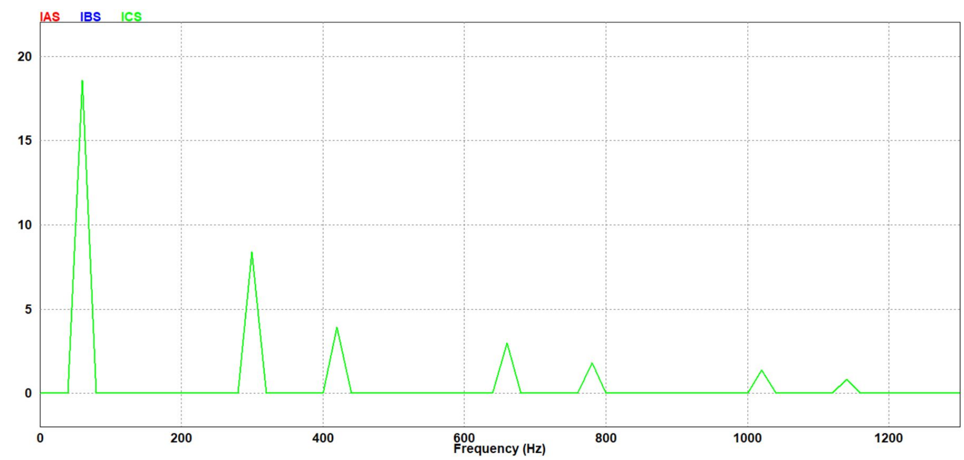

Figura 37 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente antes da compensação.

É notável, a partir da Tabela 4, que as componentes harmônicas presentes no sinal são as mesmas vistas no caso com carga RL série no lado CC do conversor, porém agora as amplitudes são consideravelmente maiores e criam outro perfil de corrente.

Esse comportamento das correntes de linha causam um perfil oscilatório nas parcelas de potências bem maior do que o visualizado no caso anterior, porém obedecendo as características antes apresentadas.

A partir do momento em que o FAP desempenha seu papel, o sinal de corrente nas linhas da rede de distribuição passam a ter o perfil quase senoidal, como esperado,

Tabela 4 – Amplitudes I_n e IHD_n para o retificador não controlado com carga RC

	I_n [A]	IHD_n %
1^o	18,18	100
5^o	8,26	45,4
7^o	3,92	21,6
11^o	2,85	15,7
13^o	1,76	9,7
17^o	1,36	7,5
19^o	0,81	4,5

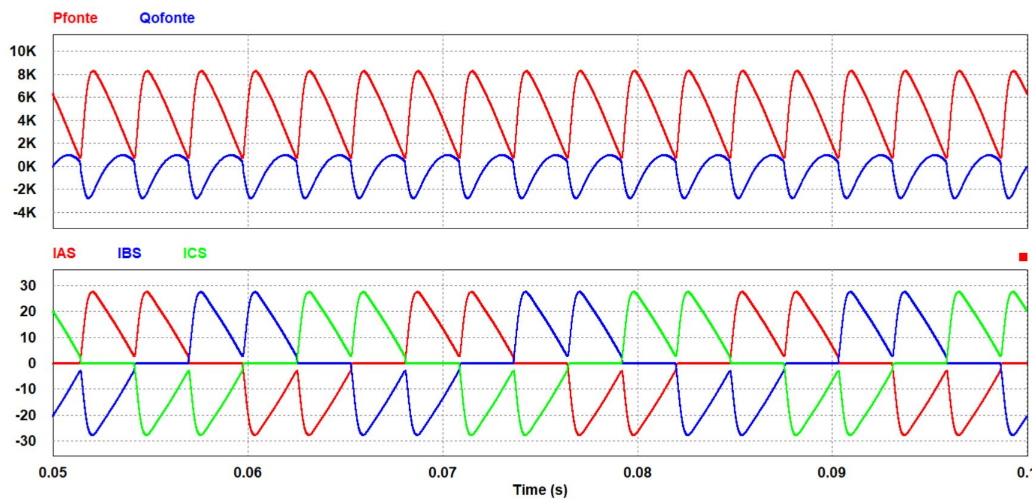

Figura 38 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas

contendo um surto de corrente quatro vezes por ciclo de tensão devido ao fato do FAP não conseguir compensar uma variação muito brusca de corrente. A Figura 39 mostra os sinais trifásicos de compensação para este tipo de perfil.

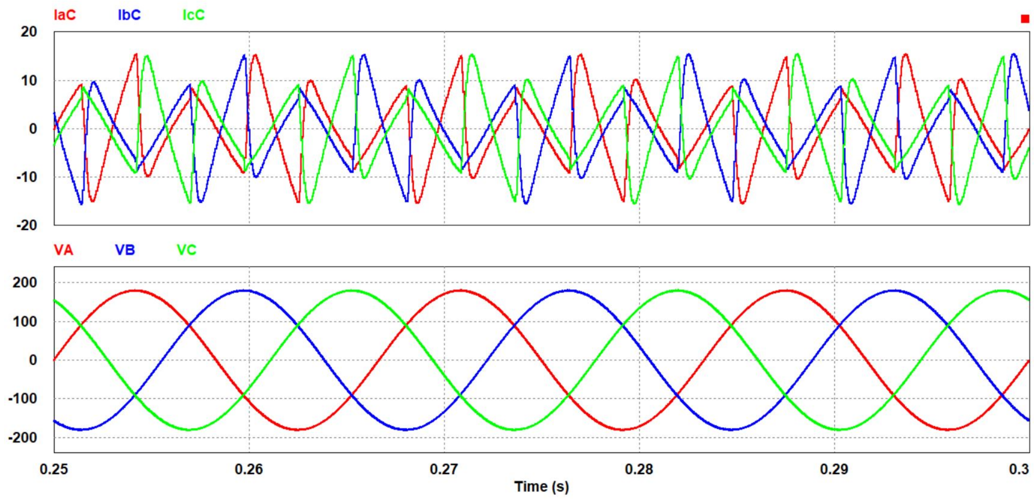

Figura 39 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

Após o acionamento do filtro, a fonte passa a fornecer basicamente apenas a parcela ativa de potência demandada pela carga. Ou seja, o FAP está fazendo com que as correntes harmônicas circulem pelos seus condutores não possibilitando que essas parcelas atinjam a fonte. O mesmo acontece com a parcela de potência reativa imposta pela carga.

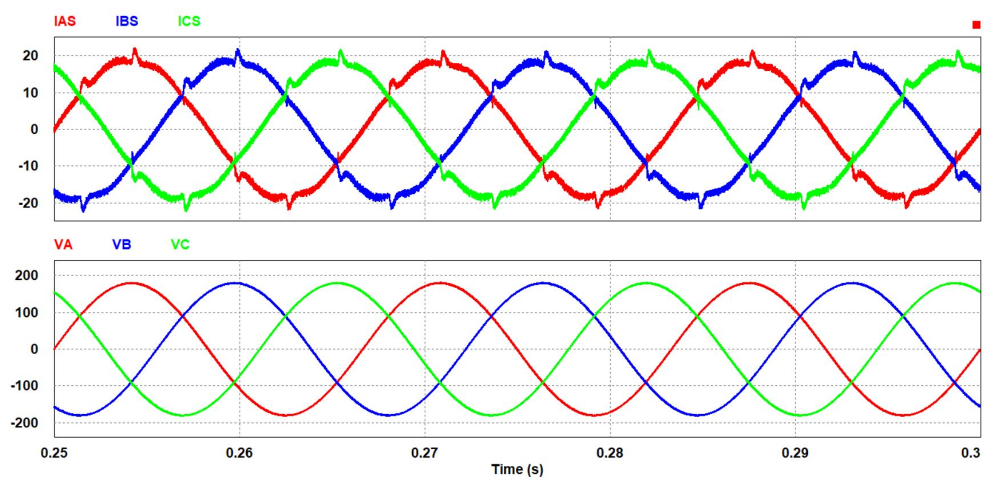

Figura 40 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico.

As componentes harmônicas antes presentes no sinal de corrente fornecido pela fonte, agora estão ausentes pelos motivos explicados acima.

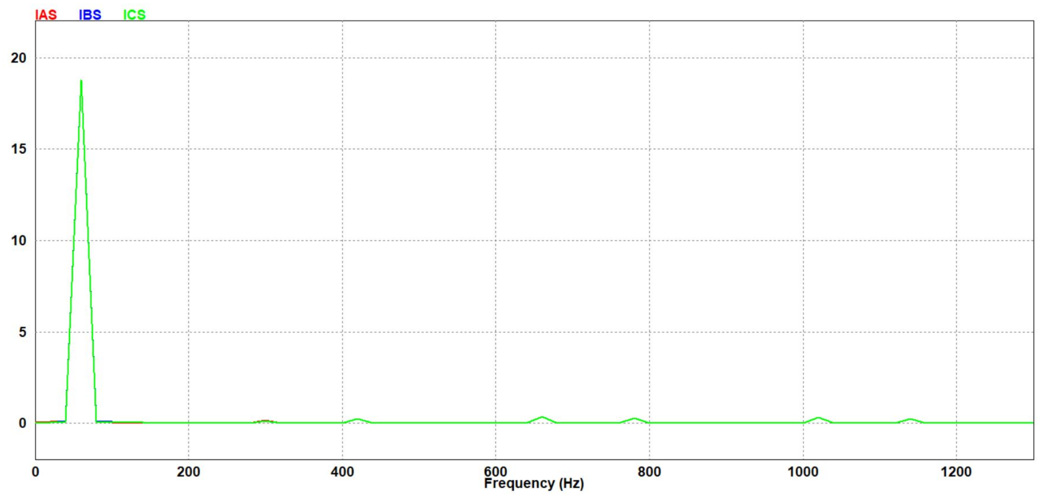

Figura 41 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento.

Para visualização melhor do comportamento temporal da resposta do sistema de controle, a Figura 42 mostra que no momento $t = 0,1s$ o FAP realiza o controle da tensão no barramento CC e então no $t = 0,2s$ passa a compensar todas as parcelas de potência não ativas. O controle da tensão no barramento CC do FAP é necessária para que os cálculos sejam coerentes.

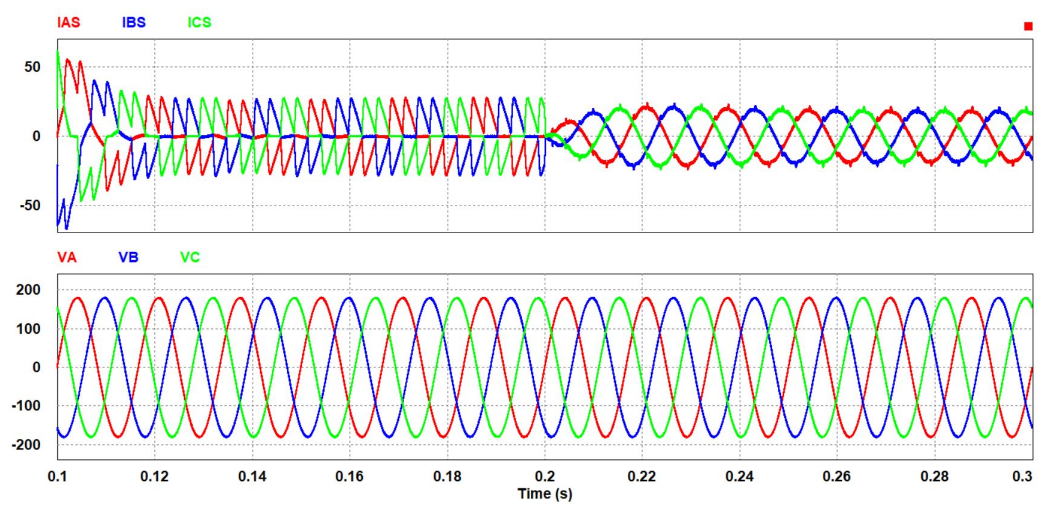

Figura 42 – Resposta do FAP.

Os surtos presentes na corrente, são devido a alta variação de corrente demandada pela carga fazendo com que ainda após o acionamento do FAP ainda existam harmônicos no sinal de corrente. O THD de corrente após a compensação, diminuiu consideravelmente.

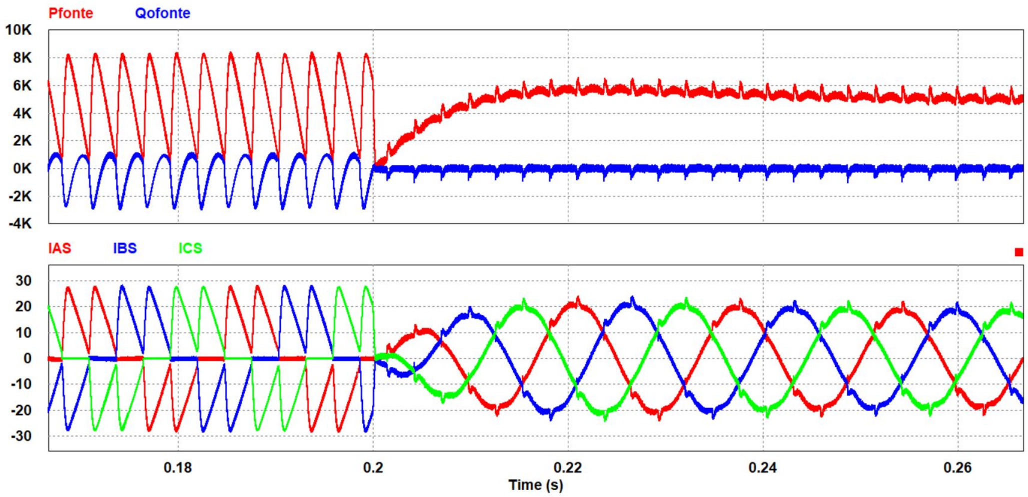

Figura 43 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte.

As correntes trifásicas do FAP, apesar de conterem as mesmas componentes harmônicas de quando o retificador era do tipo *CSI*, a variação na amplitude das componentes influencia diretamente no perfil da onda, que é mostrada na Figura 39.

Tabela 5 – Parâmetros do sistema, para o retificador não controlado com carga RC.

	Sem Compensação	Compensação
V	127 V	127 V
I	14,95 A	13,29 A
THD_i	54,2 %	5,4 %
P	4,99 kW	5,05 kW
S	5,70 kVA	5,06 kVA
FP	0,875	0,998

4.3 Retificador trifásico controlado tipo Ponte de Graetz, com carga RL série

Para ilustrar a presença de todas as parcelas das potências, p e q, a carga deve então além de absorver um perfil de corrente distorcido, ter as componentes fundamentais de tensão e corrente fora de fase. Dessa forma é esperado que os valores instantâneos de potência ativa e reativa apresentem valores médios e oscilatórios.

O retificador em análise está configurado com um ângulo de disparo $\alpha = 60^o$, esse então possui uma forma de onda de corrente quase idêntica ao caso com o retificador não controlado, porém com um defasamento angular entre fundamentais de tensão e corrente de 60^o elétricos.

A Figura 44 mostra os valores instantâneos de tensões e correntes trifásicas, por três ciclos de tensão.

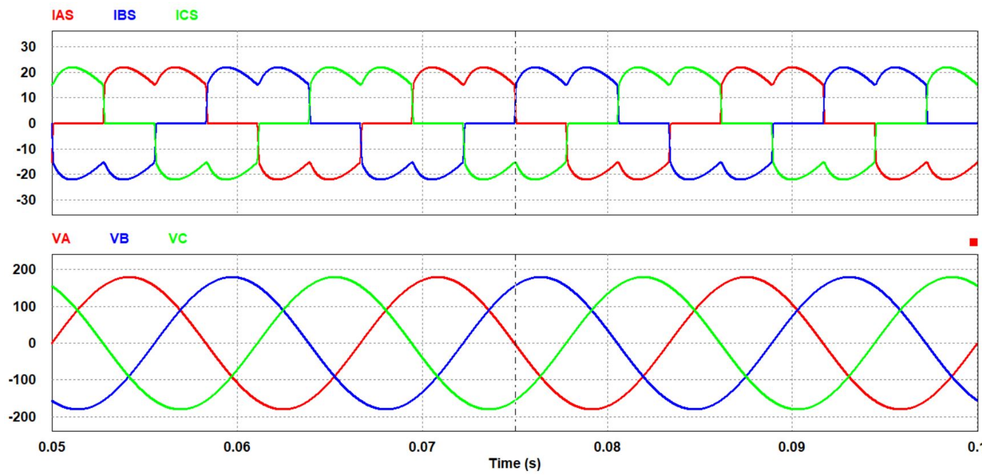

Figura 44 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga não linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

Assim, as componentes presentes no sinal de corrente são:

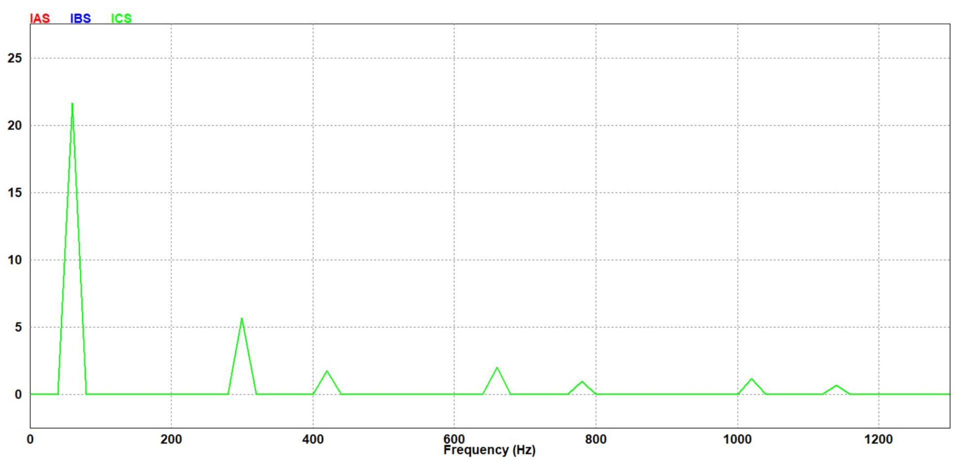

Figura 45 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para o sinal de corrente antes da compensação de correntes harmônicas.

A partir do cálculo das potências instantâneas, vistas pela fonte, o sistema pode ser caracterizado. Os valores, vistos na Figura 46, em regime permanente da potência ativa instantânea apresenta valor médio não nulo, além possuir uma oscilação periódica. O mesmo pode ser observado na potência reativa instantânea, que possui valor médio não nulo e oscilação. A informação de que o valor médio da potência reativa é não nula, deixa explícito o fato de existir defasamento angular entre fundamentais de tensão e corrente. Já as oscilações na potência ativa e reativa definem o perfil distorcido da corrente.

Tabela 6 – Amplitudes I_n e IHD_n para o sinal de corrente da fase A, para o retificador controlado com carga RL.

	I_n [A]	IHD_n %
1^o	21,46	100
5^o	5,68	26,5
7^o	1,76	8,2
11^o	1,99	9,3
13^o	0,88	4,1
17^o	1,11	5,2
19^o	0,65	3,0

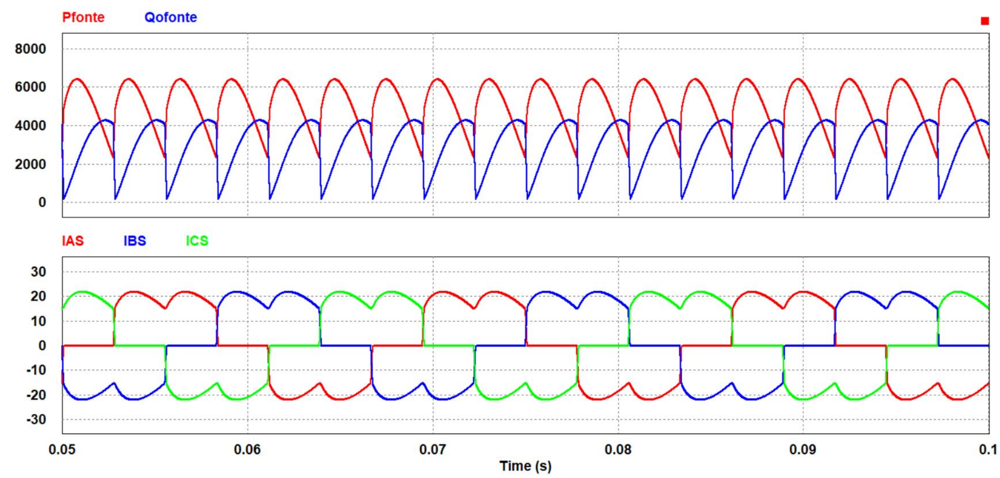

Figura 46 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas.

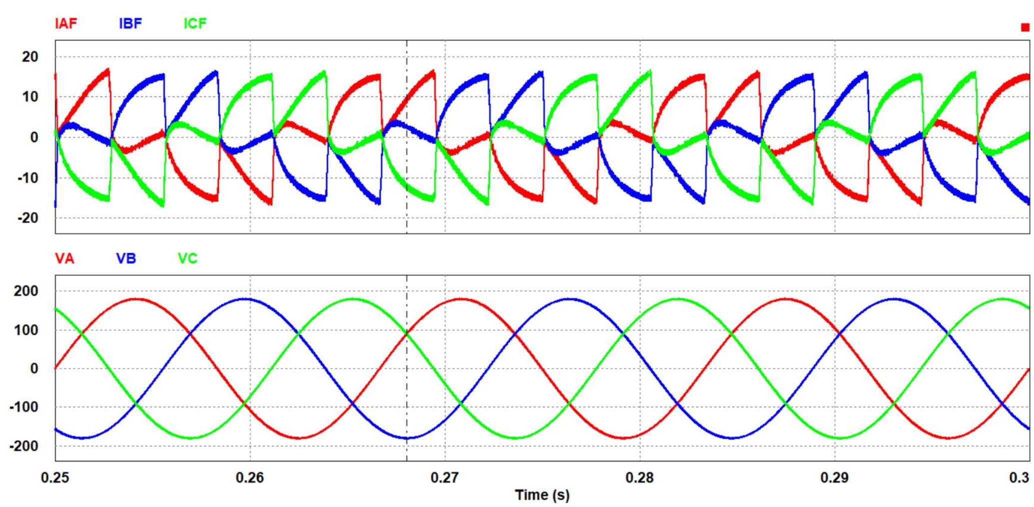

Figura 47 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

Caso o sistema estiver programado para compensar as oscilações da potência ativa e toda a potência reativa, então o sinal de corrente vai assumir o perfil senoidal. A Figura 48 mostra o comportamento da corrente vista pela fonte após a compensação.

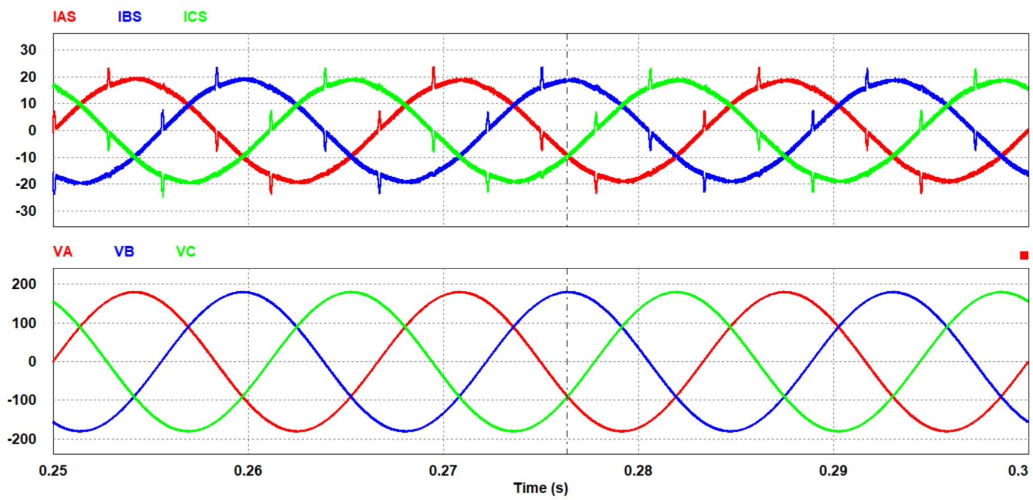

Figura 48 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico.

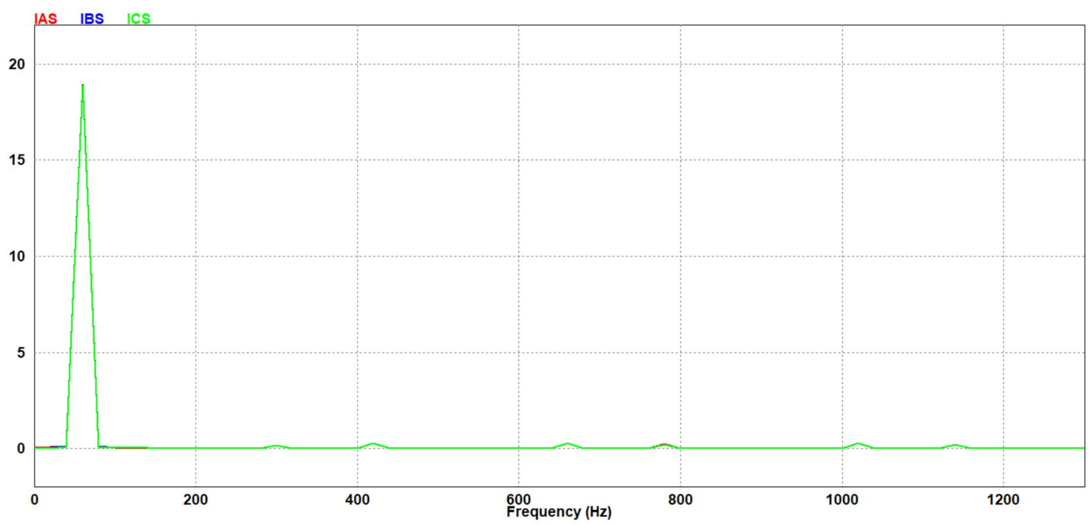

Figura 49 – Transformada Rápida de Fourier (FFT) para os sinais de corrente após a compensação de correntes harmônicas e deslocamento.

4.4 Carga trifásica RL série

Para quando a carga conectada ao sistema de distribuição apresentar característica linear, ou seja, não haver distorção harmônica de corrente, a componente reativa de potência será totalmente proveniente do defasamento angular entre tensão e corrente. A Figura 52 mostra os sinais de tensão e corrente quando este fato ocorre.

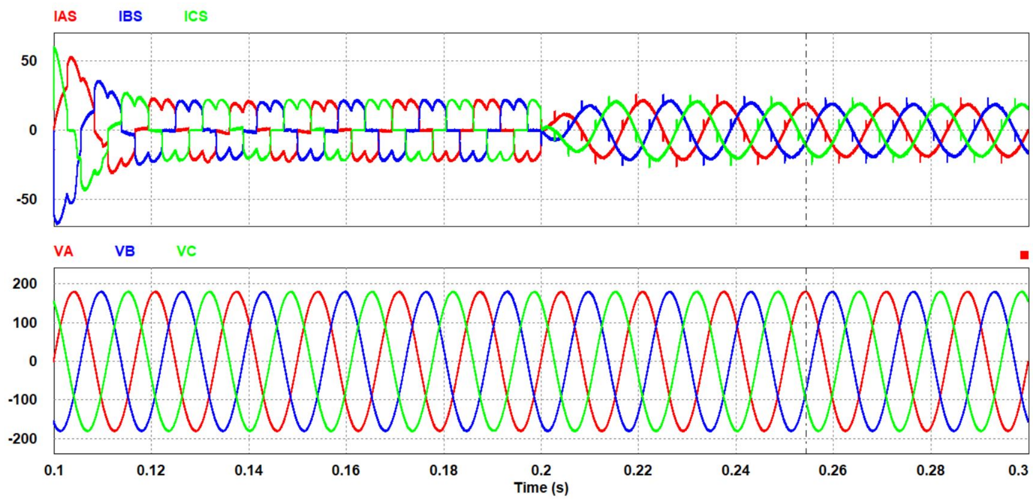

Figura 50 – Resposta do FAP.

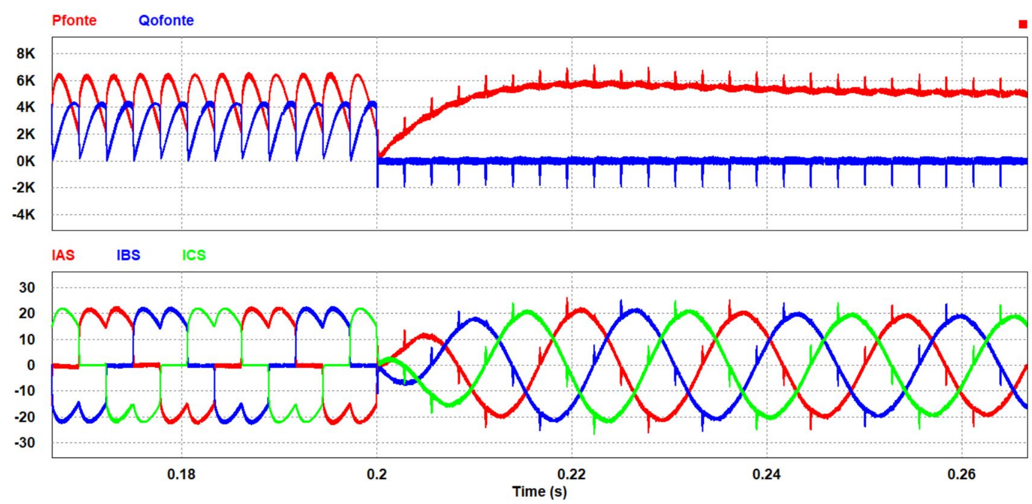

Figura 51 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte.

Tabela 7 – Parâmetros do sistema, para o retificador controlado com carga RL

	Sem Compensação	Compensação
V	127 V	127 V
I	16,03 A	13,40 A
THD_i	31,03 %	6,88 %
P	5,03 kW	5,09 kW
S	6,11 kVA	5,10 kVA
FP	0,823	0,998

Deste modo, como não há presença de componentes harmônicas em nenhum dos sinais elétricos, não haverá então oscilação nas parcelas de potências. Assim o sistema de compensação ficará encarregado de compensar apenas o valor médio da potência reativa.

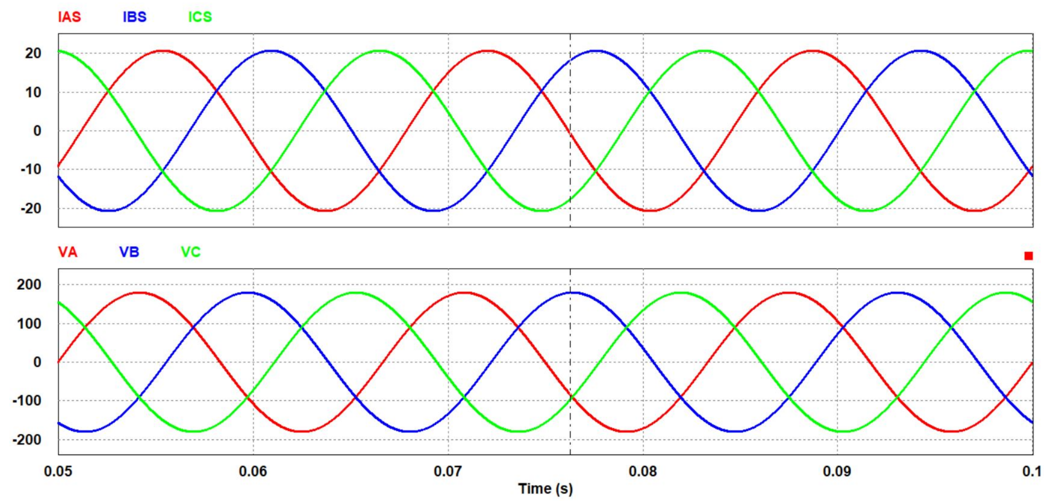

Figura 52 – Gráfico 1: Correntes trifásicas demandadas pela carga linear. / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

A Figura 53 exibe o valor de potência ativa instantânea e potência reativa instantânea antes da atuação do FAP. Para sistemas balanceados e lineares, a Transformada de Clarke se torna uma ferramenta muito útil para a extração dos valores de potência ativa e reativa que circulam no circuito.

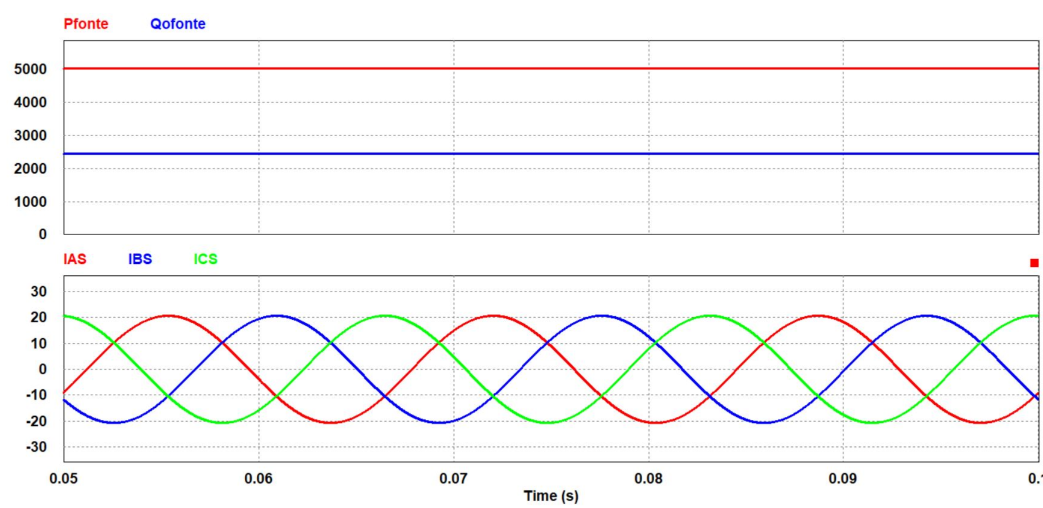

Figura 53 – Gráfico 1: Potência Ativa Instantânea (vermelho) e Potência Reativa Instantânea (azul) / Gráfico 2: Correntes de linha trifásicas.

Após a compensação de potência reativa o sinal de corrente passa a estar em fase com a tensão da fase respectiva, assim apresentando fluxo apenas de potência ativa, como visto na Figura 57. Apesar de, novamente, o sinal de corrente apresentar uma oscilação de alta frequência devida ao chaveamento dos semicondutores, de forma geral o sinal tem um comportamento muito próximo ao senoidal.

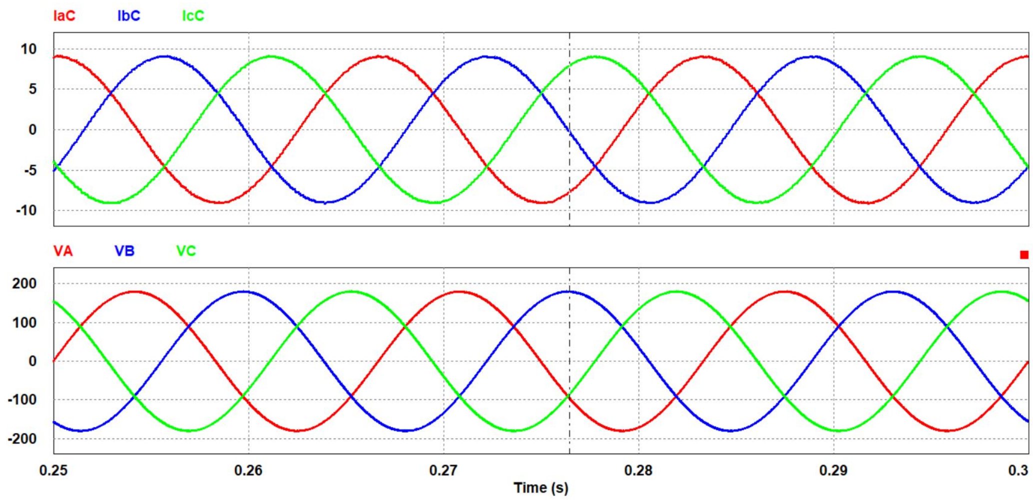

Figura 54 – Gráfico 1: Sinais de referência calculados para as correntes de compensação do sistema / Gráfico 2: Tensões trifásicas.

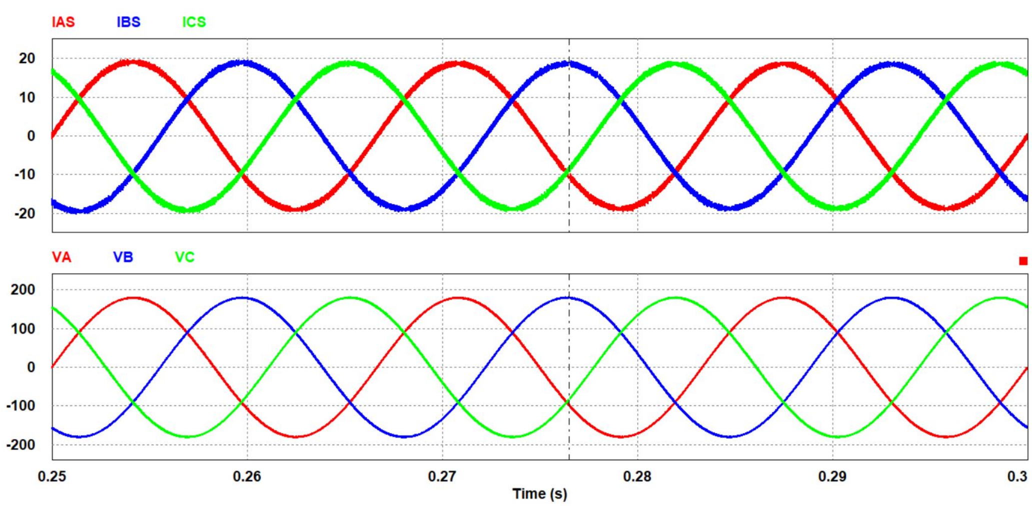

Figura 55 – Gráfico 1: Sinais de corrente trifásicas vistas pela fonte após a compensação. / Gráfico 2: Sinais de tensão trifásico.

Tabela 8 – Parâmetros do sistema, para carga RL trifásica

	Sem Compensação	Compensação
V	127 V	127 V
I	14,64 A	13,34 A
THD_i	0,00 %	2,62 %
P	5,02 kW	5,08 kW
S	5,58 kVA	5,09 kVA
FP	0,899	0,998

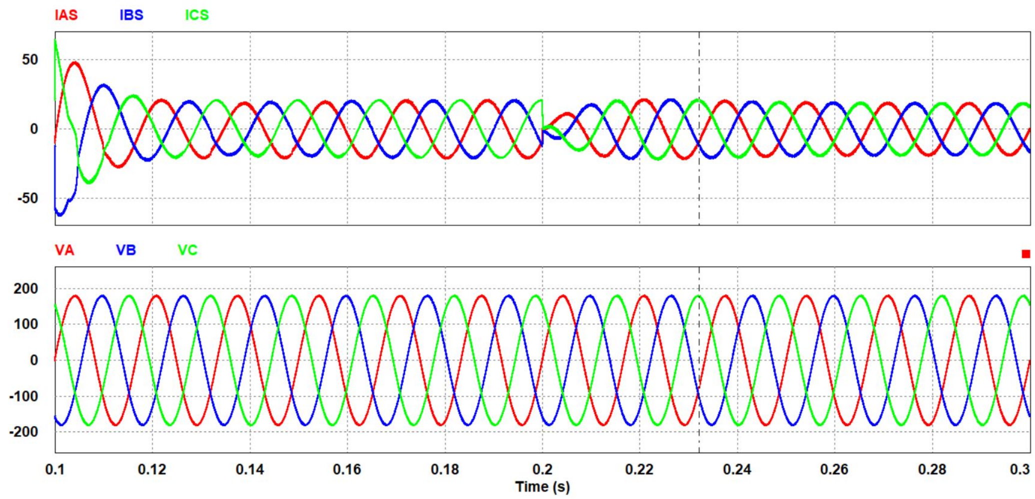

Figura 56 – Resposta do FAP.

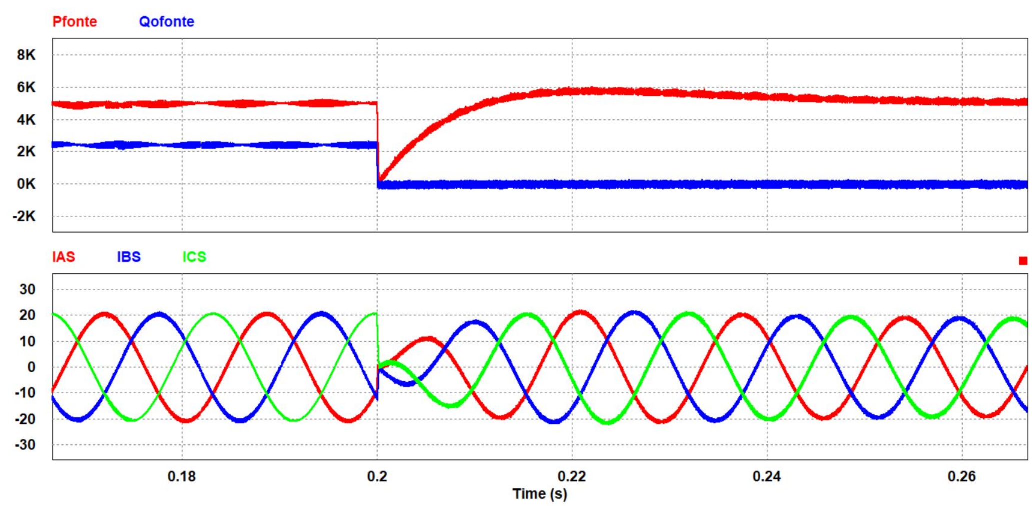

Figura 57 – Gráfico 1: Potência Ativa (p) e Reativa (q) Instantânea vista pela fonte / Gráfico 2: Correntes trifásicas vistas pela fonte.

5 Conclusão

As equações desenvolvidas durante esse texto exibem uma análise de sistemas trifásicos em corrente alternada. A Teoria da Potência Instantânea, principalmente, cria artifícios matemáticos que ajudam na definição de parâmetros relacionados a qualidade da energia elétrica e facilita o processo de obtenção de correntes de referência para o acionamento do FAP e então atenuar as componentes harmônicas presentes no sinal de corrente visto pela rede de distribuição.

A partir das simulações, foi possível caracterizar cada tipo de carga estudado a segundo os indicadores de qualidade calculados, como TDH e IDH, além de que o comportamento temporal das funções de potências instantâneas também conseguem transmitir grandes quantidades de informações a cerca de como o sistema está operando.

Na grande maioria dos casos, a ação do FAP foi muito satisfatória na diminuição das amplitudes das componentes harmônicas, salvo para quando a carga conectada ao barramento CC do retificador era RC paralelo. Assim o controle do nível de tensão no barramento CC do FAP pode trazer ainda melhor dinâmica para o sistema, ainda até para regimes transitórios. Outra proposta de continuidade será verificar o comportamento com inclusão de cargas monofásicas e bifásicas, bem como testar outra estratégia de controle em substituição ao Histerese.

Referências

AKAGI, H. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. [S.l.: s.n.], 2007. ISBN 978-94-007-7805-4. 7, 4, 11, 13, 14, 15, 20, 21, 28, 30, 33

AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-20, n. 3, p. 625–630, 1984. ISSN 19399367. 10, 20

AKAGI, H.; OGASAWARA, S.; KIM, H. The theory of instantaneous power in three-phase four-wire systems and its applications. *Electrical Engineering in Japan (English translation of Denki Gakkai Ronbunshi)*, v. 135, n. 3, p. 74–86, 2001. ISSN 04247760. 6

BALCI, M. E.; HOCAOGLU, M. H. A current resolution for fast measurement of power resolutions in non sinusoidal single phase systems. *ICHQP 2010 - 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power*, 2010. 4

BENGHANEM, M.; ALRADADI, E. A.; DRAOU, A. A new modified PQ theory used for reactive power and current harmonic compensation. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2006. SPEEDAM 2006*, v. 2006, p. 1306–1309, 2006. 10

COMMITTEE, P. S. I.; MEASUREMENT. *IEEE Standard Definitions fot the Measurement of Eletric Power Quatities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*. [S.l.: s.n.], 2010. ISBN 9780738160580. 7, 11

CZARNECKI, L. New power theory of the 3-phase non-linear asymmetrical circuits supplied from nonsinusoidal voltage sources. *Circuits and Systems, 1988., IEEE International ...*, p. 1627–1630, 1988. ISSN 02714310. 6

CZARNECKI, L. S. What is Wrong with the Budeanu Concept of Reactive and Distortion Power and Why It Should be Abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IM-36, n. 3, p. 834–837, 1987. ISSN 15579662. 3

CZARNECKI, L. S. From steinmetz to currents' physical components (CPC): History of power theory development. *2016 International Conference on Applied and Theoretical Electricity, ICATE 2016 - Proceedings*, 2016. 7, 1, 2

DEB, P. et al. Three-Phase Shunt Active Filter for Power Electronic Converters. v. 2, n. 12, p. 7715–7723, 2013. 10

EMADI, A.; NASIRI, A.; BEKIAROV, S. B. *Uninterruptible Power Supplies and Active Filters*. [S.l.: s.n.], 2015. ISBN 0849330351. 7, 11, 31, 32

FOGLI, G. A. et al. Grid connected PV System with Load Power Compensation Capability using Sliding Mode Control. 2015. 38

FORTESCUE, C. L. Method of Symmetrical Co-Ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, XXXVII, n. 2, p. 1027–1140, 1918. ISSN 0096-3860. 16

JELTSEMA, D. Budeanu's concept of reactive and distortion power revisited. *12th Conference-Seminar: International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation, ISNCC 2015 - Conference Proceedings*, 2015. ISSN 0033-2097. 2

JELTSEMA, D.; WOUDE, J. W. van der; HARTMAN, M. T. A Novel Time-Domain Perspective of the CPC Power Theory: Single-Phase Systems. p. 1–10, 2014. 1, 3

MIKKILI, S.; PANDA, A. K. *Power Quality Issues*. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 9781498729635. 7, 11, 17, 25

PENELLO, L. F.; WATANABE, E. H. Filtro Ativo de Potência Tipo "Shunt"Com Seleção da Potência a ser Compensada. v. 4, p. 31–37, 1993. 10

SINGH, B.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. *Power Quality Problems and Mitigation Techniques*. [S.l.: s.n.], 2015. 582 p. ISSN 19324529. ISBN 9781118922064. 7, 11, 18, 26

THAHAB, R. T.; ASUMADU, J. A. Current decomposition based on a double/multiple synochrouns reference frames and Fryze-Buchholz-Depenbrock theory for a non-islanded microgrid with a finite control set-model predictive controller: A comparative approach. *2017 IEEE 3rd International Future Energy Electronics Conference and ECCE Asia, IFEEC - ECCE Asia 2017*, p. 356–363, 2017. 5, 6

WILLEMS, J. L. A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, v. 41, n. 4, p. 523–527, 1992. ISSN 15579662. 10

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "ESTUDO DE FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 01 de AGOSTO de 2018.

JOSÉ ANDRÉ TEBAR DE FARIA
Nome completo do(a) aluno(a)

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Colegiado do Curso de Engenharia de Elétrica

ANEXO XI - DECLARAÇÃO DE CONFERÊNCIA DA VERSÃO FINAL

Declaro que conferi a versão final a ser entregue pelo aluno José André Tebar de Faria, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado Estudo de Filtro Ativo de Potência Conectado à Rede Elétrica de Distribuiçã quanto à conformidade nos seguintes itens:

1. A monografia corresponde a versão final, estando de acordo com as sugestões e correções sugeridas pela banca e seguindo as normas ABNT;
2. A versão final da monografia inclui a ata de defesa (ANEXO IV - apenas verso), a ficha catalográfica e o termo de responsabilidade (ANEXO X -) devidamente assinados.

João Monlevade, 15 de agosto de 2018.

Gabriel Azevedo Fogli

Nome do(a) Professor(a)
Gabriel Azevedo Fogli