

# UMA REVISÃO DA MODELAGEM DE FILTROS ATIVOS PARA ATENUAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS E DESEQUILÍBRIOS DE TENSÃO UTILIZANDO A TEORIA P-Q

EDUARDO T. SILVÉRIO, JOSÉ RUBENS. M. JUNIOR

*Laboratório de Distribuição de Energia Elétrica, Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia*

*Avenida João Naves de Ávila, 2121 – Campus Santa Mônica, Uberlândia – MG, 38400-902*

*E-mails: [eduardot.silverio@ufu.br](mailto:eduardot.silverio@ufu.br), [jrubens@ufu.br](mailto:jrubens@ufu.br)*

**Abstract**— The advancement of power electronics and its wide application in industrial and domestic devices has promoted an increase in the percentage of non-linear loads connected in the electrical networks over the last decades. This type of device promotes the injection of harmonic currents in the electrical networks, increasing the levels of harmonic distortion of voltage and current throughout the system. At the same time, the large number of single-phase loads connected to the grid, whether linear or non-linear, promotes an increase in voltage and current unbalance levels in the electric power distribution networks. Based on these facts, the present work proposes a review on a computational modelling of a Shunt Active Filter (SAF) with the goal of promoting the attenuation of those effects. All aspects of the computational implementation are presented in the paper, including its topology, the calculation of compensation currents, the application of instantaneous power theory, as well as the process of adjusting the gains of the control system to synthesize the current to be injected by the SAF. The results showed a significant reduction in the amplitudes of harmonic distortion of the line current (releasing system capacity), thereby establishing consistent results with the proposal of this work.

**Keywords**— Shunt active filter, power quality, instantaneous power theory, pq-theory.

**Resumo**— O avanço da eletrônica de potência e sua ampla aplicação em equipamentos, tanto domésticos como industriais, fez com que o percentual de cargas não-lineares conectadas nas redes elétricas aumentasse consideravelmente ao longo das últimas décadas. Esse tipo de carga promove a injeção de correntes harmônicas nas redes elétricas, incrementando os níveis de distorção harmônica de tensão e corrente em todo o sistema. Ao mesmo tempo, o grande número de cargas monofásicas conectadas à rede elétrica, sejam elas lineares ou não-lineares, promovem o incremento dos níveis de desequilíbrio de tensão e corrente nas redes de distribuição de energia elétrica. Dessa forma, o presente trabalho propõe uma revisão da modelagem do Filtro Ativo Paralelo (FAP) com o objetivo de promover a atenuação desses efeitos. Todos os aspectos dessa implementação computacional são mostrados no trabalho, incluindo sua topologia, o método de cálculo das correntes de compensação, a aplicação da teoria da potência instantânea, assim como o processo de ajuste dos ganhos do sistema de controle para a síntese das correntes injetadas pelo filtro. Os resultados obtidos demonstraram uma redução considerável nas amplitudes da distorção harmônica da corrente de linha, resultando na liberação de capacidade do sistema, estabelecendo resultados coerentes com a proposta desse trabalho.

**Palavras-chave**— Filtro ativo paralelo trifásico, qualidade da energia elétrica, teoria da potência instantânea, teoria P-Q.

## 1 Introdução

No sistema de distribuição de energia elétrica, a imensa variedade de tipos de cargas, o chaveamento de dispositivos eletrônicos, a presença de elementos eletromagnéticos saturados e ainda o desequilíbrio das cargas na rede traz consigo efeitos indesejados, que podem ser traduzidos pela distorção das formas de onda, assim como pelo nível de desequilíbrio de tensão e corrente entre as diferentes fases do sistema.

A fim de apresentar uma forma de correção para as distorções geradas pela inserção de cargas não-lineares no sistema de distribuição, Akagi *et al* (1984) vislumbraram um novo método de cálculo de potência, o qual visa discriminar a potência instantânea real e imaginária em duas parcelas: potência média e potência oscilante, esta representa toda a potência presente devido às variações da forma de onda ideal de tensão e corrente, ou seja, senoidal e equilibrada. Essa separação torna possível o cálculo da corrente de compensação, que, por meio de conversores eletrônicos de potência e lógica de controle é aplicada à rede de forma a compensar as distorções harmônicas e o desequilíbrio. Esta descrição remete à

criação, funcionalidade e objetivo do filtro ativo paralelo.

Com isso em mente, este trabalho visa discutir o processo de determinação da corrente de compensação, esclarecer o método de eliminação das componentes harmônicas no circuito de potência, compreender a estrutura do filtro ativo paralelo, o desempenho dos principais elementos para o funcionamento adequado do equipamento, a importância da harmonia entre os elementos de potência com o sistema de controle, além de analisar como estes elementos interagem entre si e, por fim, determinar a eficiência do filtro ao corrigir a corrente vista pela fonte, independentemente do tipo de carga. Para isto, foram estudadas três condições distintas de carga: uma carga não-linear não controlada, uma carga desequilibrada e a combinação de ambas. A plataforma computacional utilizada para o estudo e simulações foi o *Simulink* Matlab® R2016a.

## 2 Filtro Ativo Paralelo

A função do filtro ativo paralelo é gerar formas de onda de corrente com defasagem de 180° em rela-

ção às componentes harmônicas injetadas por cargas não-lineares conectadas à rede elétrica. O propósito é que a corrente injetada pelo filtro seja capaz de anular as componentes harmônicas injetadas pelas cargas não-lineares, de forma que, no Ponto de Conexão, a forma de onda de corrente tenha comportamento similar ao de uma carga linear, independentemente do tipo de carga conectada a jusante deste ponto. A Figura 1 mostra a forma de conexão do FAP ao Sistema Elétrico de Potência (SEP), além de indicar a expectativa de formas de onda de corrente em cada ramo do sistema.

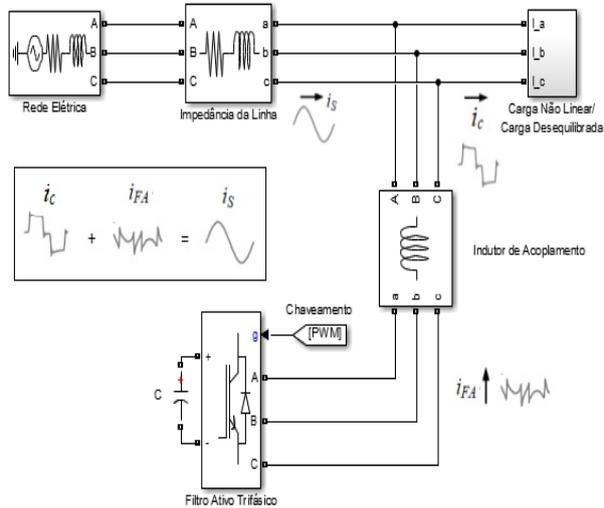


Figura 1. Sistema elétrico com atuação do FAP

Com o intuito de expor a funcionalidade e a forma de garantir a atenuação de harmônicas por meio do FAP, serão discutidas nas seções seguintes a estrutura de potência deste equipamento, a forma de cálculo das correntes de compensação, ou seja, correntes a serem injetadas pelo filtro, e a estrutura de controle adotada para comandar o chaveamento do inversor CA/CC.

### 2.1 Estrutura do FAP

A estruturação do filtro ativo paralelo consiste em um conversor CA/CC, cujo lado CA está conectado à rede elétrica. Enquanto no lado CC há um capacitor conectado, o qual tem a função armazenar energia e manter a tensão CC maior que no lado CA. Esta tensão deve ser o dobro da amplitude da tensão CA, para garantir o funcionamento adequado do filtro ativo, como afirma Bianchin *et al* (2007). As Figuras 2 e 3 ilustram a topologia descrita anteriormente.

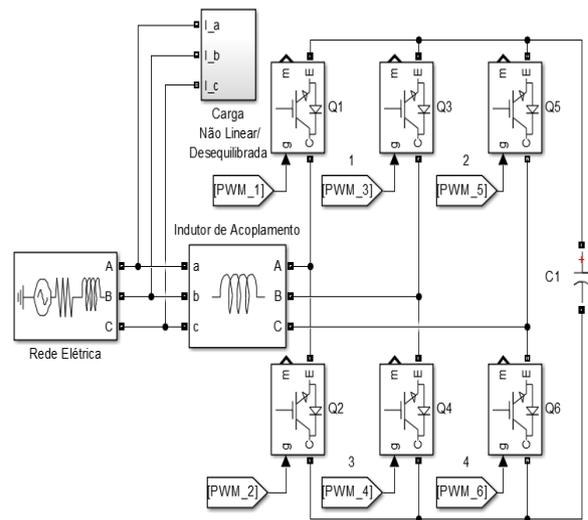


Figura 2. Estrutura do FAP detalhado com IGBT/Diodo

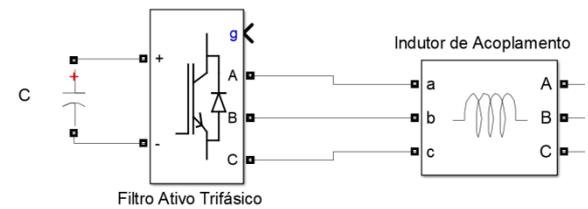


Figura 3. Estrutura do FAP simplificado em blocos trifásicos

### 2.2 Cálculo das correntes de compensação pela Teoria P-Q

A Teoria P-Q foi desenvolvida utilizando como base os valores instantâneos de tensões e correntes trifásicas em um sistema elétrico de potência, diferentemente da teoria clássica, a qual assume os valores médios de tais grandezas elétricas. Akagi *et al* (1984) propuseram tal teoria para eliminar a injeção de correntes harmônicas, devido a conexão de cargas não-lineares ao SEP, e realizar a compensação de potência reativa sem elementos armazenadores de energia.

Assim, pode-se afirmar que o objetivo matemático da Teoria P-Q é distinguir a potência destinada, exclusivamente, para a componente fundamental das demais possíveis componentes presentes, por exemplo, harmônicos.

Para a compreensão do objetivo matemático da Teoria P-Q descrito anteriormente, é necessário vislumbrar o método de cálculo das potências instantâneas. Dito isso, tem-se que as tensões da fonte e correntes de carga são transformadas das coordenadas  $abc$  para coordenadas  $\alpha\beta$  como mostram em (1) e (2).

$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

O cálculo da potência instantânea real  $p$  consiste no produto de tensões por correntes das componentes de Clarke sendo igual à potência instantânea convencional  $p_{3\phi}$ , vide Equação (3), enquanto a potência instantânea imaginária  $q$ , definida em Akagi *et al* (1984), é determinada pelo produto de tensões e correntes de componentes distintas nas coordenadas de Clarke, como mostrada em (4).

$$p = e_\alpha \cdot i_\alpha + e_\beta \cdot i_\beta \quad (3)$$

$$q = e_\alpha \cdot i_\beta - e_\beta \cdot i_\alpha \quad (4)$$

Reescrevendo as Equações (3) e (4) em forma matricial é obtida a Equação (5).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Após estabelecidas as diretrizes de cálculo de potências instantâneas real e imaginária de acordo com a Teoria P-Q, é possível extrapolar mais um conceito que Akagi *et al* (1984, 2004 e 2007) desenvolveram. Ambas as potências apresentadas na Equação (5) possuem uma componente CC, ou potência média, e uma componente CA, potência oscilante, ou seja,  $p = \bar{p} + \tilde{p}$  e  $q = \bar{q} + \tilde{q}$ , onde  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  representam as componentes contínuas das potências instantâneas real, que é equivalente a potência instantânea ativa convencional, e imaginária, que é equivalente a potência instantânea reativa convencional. As componentes oscilantes representam os valores instantâneos das potências real  $\tilde{p}$  e imaginária  $\tilde{q}$  para correntes harmônicas e/ou desequilíbrios entre as fases, encontrados nas correntes de carga. Portanto a Equação (5) pode ser reescrita na Equação (6).

$$\begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$$

Com as potências bem definidas e discriminadas, é possível determinar a soma das componentes harmônicas nas correntes de carga.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &+ \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

Realizando os cálculos e desmembrando a Equação matricial (7), tem-se as seguintes componentes de corrente.

$$i_{\alpha\bar{p}} = \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{p} \quad (8)$$

$$i_{\alpha\tilde{p}} = \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{p} \quad (9)$$

$$i_{\alpha\bar{q}} = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{q} \quad (10)$$

$$i_{\alpha\tilde{q}} = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{q} \quad (11)$$

$$i_{\beta\bar{p}} = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{p} \quad (12)$$

$$i_{\beta\tilde{p}} = \frac{e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{p} \quad (13)$$

$$i_{\beta\bar{q}} = \frac{-e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{q} \quad (14)$$

$$i_{\beta\tilde{q}} = \frac{-e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{q} \quad (15)$$

Como explicitado anteriormente, as componentes oscilantes representam a contribuição das harmônicas, as quais agora estão discriminadas em componentes  $\alpha\beta$ . Assim, é possível determinar as componentes que devem ser sintetizadas pelo filtro ativo, de forma a mitigar a poluição na forma de onda de tensão e corrente ocasionadas pelas cargas não-lineares no SEP. Estas correntes de compensação são representadas pela soma de todas as componentes oscilantes, ou seja, o somatório das Equações (9), (11), (13) e (15). Para a correta sintetização das correntes pelo filtro, foi trabalhado com referências de corrente de compensação em componentes  $abc$ , para isso utiliza-se da transformada inversa de Clarke, como mostra a Equação (16).

$$\begin{bmatrix} i_{a\text{compensação}} \\ i_{b\text{compensação}} \\ i_{c\text{compensação}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha\tilde{p}} + i_{\alpha\tilde{q}} \\ i_{\beta\tilde{p}} + i_{\beta\tilde{q}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

### 2.3 Estratégia de Controle para sintetização das correntes de compensação

Tendo conhecimento da forma de onda das correntes de compensação, deve-se, então, trabalhar no circuito de potência capaz de gerar correntes de acordo com a referência calculada. Para isso, é utilizado o conversor CA/CC, que tem como tarefa sintetizar a corrente de compensação. Construída a corrente de compensação, esta é injetada na rede com ângulo de fase igual a 180° da corrente de carga medida, anulando as componentes indesejadas, fato comprovado pela Lei de Kirchhoff das Correntes (LKC) aplicada no Ponto de Conexão (vide Figura 1).

Como é observado no item 2.1 e na Figura 2, o conversor possui elementos de chaveamento estático em sua estrutura, determinando perdas intrínsecas ao seu modo de operação. Em outras palavras, na comu-

tação do estado *on* para *off* e vice-versa, a chave consome potência. Tal comutação determina uma flutuação de tensão no capacitor, representado pelo *ripple*. O consumo de potência devido ao chaveamento, somada às perdas de potência nos condutores por  $RI^2$ , caracteriza consumo de parte da potência proveniente do capacitor nas oscilações. Esta perda energética será designada  $p_{loss}$ , a qual deve ser adicionada às potências instantâneas reais oscilantes  $\tilde{p}$  para, enfim, determinar uma corrente real de compensação adequada.

A determinação de  $p_{loss}$  é dada por meio do sinal de saída do controle que monitora a tensão nos terminais do capacitor. De forma a manter o sinal em questão, o mais próximo possível, de um sinal constante, isto é, com pequenas oscilações. É utilizado, então, um controlador Proporcional-Integral (PI), o qual assegura um erro nulo em regime permanente (ganho integral).

Com a estabilização da tensão no capacitor proporcionada pelo PI, tem-se a  $p_{loss}$  na saída do controlador, a qual é inserida no cálculo das correntes de compensação, como dito anteriormente. A próxima etapa consiste na geração dos pulsos para o chaveamento correto dos blocos IGBT/Diodo do inversor. A geração dos pulsos é feita utilizando-se controle modulação por largura de pulso (*pulse width modulation, PWM*), onde estado alto no *gate* da chave representa fechamento da chave e estado baixo abertura da chave.

A fim de determinar os instantes de chaveamento o método de controle por histerese, que compara o sinal de referência com o sinal de saída do filtro, de modo que o erro entre os sinais seja sempre menor que o limite estabelecido. Em outras palavras: a corrente de saída do filtro oscilará dentro de uma banda de histerese, a qual é determinada pelo erro máximo permitido entre os dois sinais, em torno da corrente de referência, calculada pela Equação 16. É importante salientar que o funcionamento dos blocos IGBT/Diodo em cada ramo do inversor é dado de forma complementar, ou seja, se Q1 está chaveado, logo Q2 estará em aberto, sendo esta lógica aplicada para os outros ramos do inversor (vide Figura 2).

### 3 Simulação Computacional

A simulação computacional foi realizada por meio do *software* Matlab R2016a, com auxílio da ferramenta *Simulink*. Neste item, o objetivo é apresentar cada bloco utilizado e determinar sua função para o funcionamento adequado do FAP. A começar pelo equivalente da rede elétrica, demarcado na Figura 4. A rede elétrica foi modelada com tensão de linha nominal de 380V, frequência igual a 60 Hz, e com nível de curto-circuito infinito, esta última característica é sugerida por Sousa (2011).

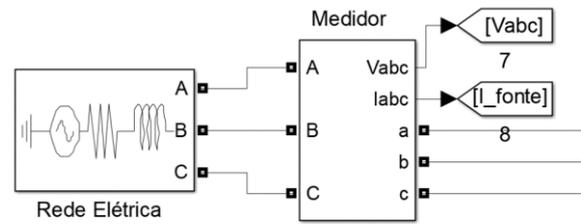


Figura 4. Equivalente da rede elétrica

Além da modelagem equivalente da rede elétrica, é de suma importância o modo de simulação das cargas. Nas Figuras 5 e 6 são expostas as configurações de blocos para a carga não-linear e da carga desequilibrada, respectivamente. No que tange à carga não-linear, esta foi representada por uma ponte retificadora não-controlada devido sua alta capacidade de geração harmônica. Em relação à carga desequilibrada, a mesma foi representada por impedâncias elétricas distintas em cada fase conectadas em estrela flutuante, de forma a excluir quaisquer componentes de sequência zero, proporcionando, desta forma, o efeito de desequilíbrio desejado, tanto em amplitude como também em fase.

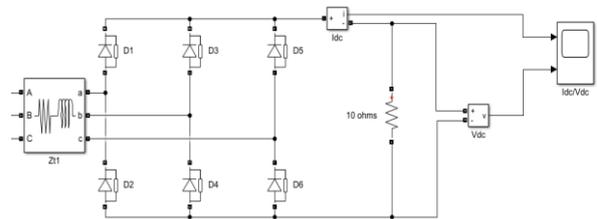


Figura 5. Diagrama de blocos da carga não-linear

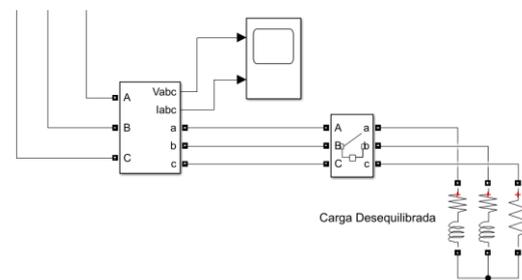


Figura 6. Diagrama de blocos da carga desequilibrada

Por fim, é explicitado o desenvolvimento dos blocos de controle para o acionamento das chaves do inversor, para a sintetização das correntes de compensação, como mostra a Figura 7. O sistema de controle da tensão CC baseia-se no monitoramento da tensão no capacitor. Dessa forma, ressalta-se, novamente, a importância do controlador PI descrito anteriormente para estabilizar a tensão em um valor determinado, como sugere Bianchin *et al* (2007). A tensão no capacitor é calculada pela Equação 17, onde  $V_a$  representa a tensão de fase da rede elétrica. Neste caso a tensão calculada para o capacitor é  $V_{CC} = 850$  V.

$$V_{CC} \geq \frac{3}{2} V_a \sqrt{2} \sqrt{3} \quad (17)$$

Com a intenção de estabilizar a tensão no elo CC, o controlador PI foi sintonizado de acordo com o método de tentativa e erro descrito em Souza (2013), como mostra a Figura 8. O método consiste em manter o ganho  $K_i = 0$  e aumentar o ganho  $K_p$  de forma a alcançar a resposta ao degrau desejada. Assim que a resposta do sistema for satisfatória em regime permanente, fixa-se o valor de  $K_p$  e aumenta-se, agora, o valor de  $K_i$ , a fim de melhorar a resposta em regime transitório. Neste caso, a sintonia ocorreu em  $K_p = 100$  e  $K_i = 10$ . Imediatamente na saída do PI, encontra-se o sinal de  $p_{loss}$ , que é inserido no bloco de cálculo das correntes de compensação juntamente com as tensões senoidais e as correntes da carga.

A Figura 9 mostra os blocos de cálculo para determinação das correntes de compensação. Nesta etapa, é interessante destacar que a obtenção de  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  é realizada pela filtragem dos sinais  $p$  e  $q$ , respectivamente, por um filtro passa baixa de 5ª ordem sintonizado para  $2\pi 30$  rad/s. Assim realizando as devidas operações matemáticas para a obtenção das componentes oscilantes da potência instantânea, tem-se a finalização da atuação do controle para sintetização das correntes de referência. Finalmente, depois de calculada a corrente de referência, ou seja, a corrente de compensação, a mesma é comparada com corrente de saída do filtro. Na Figura 10 é mostrada a comparação por banda de histerese, que neste caso é determinada como banda nula, caracterizando a corrente injetada pelo filtro como idêntica à calculada.

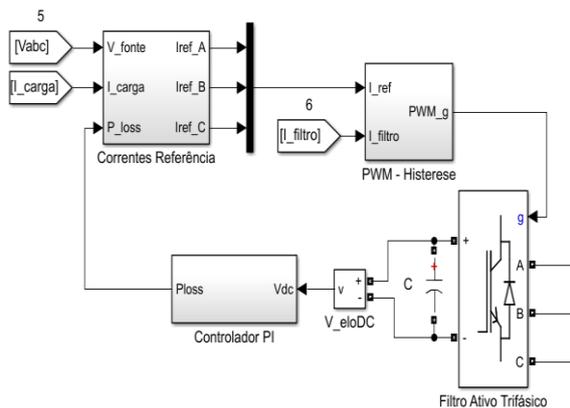


Figura 7. Diagrama de blocos de comando das chaves do filtro ativo trifásico

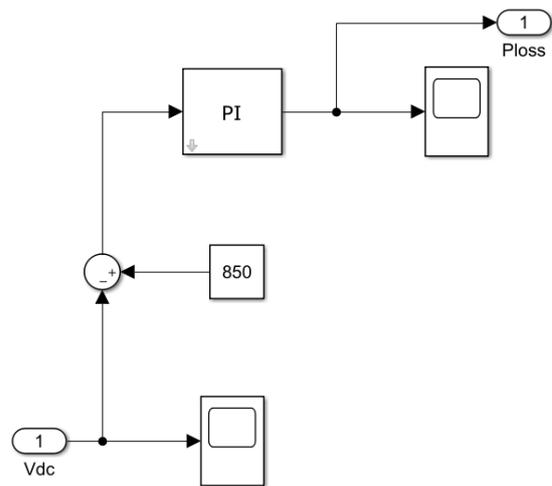


Figura 8. Diagrama de blocos do controlador PI

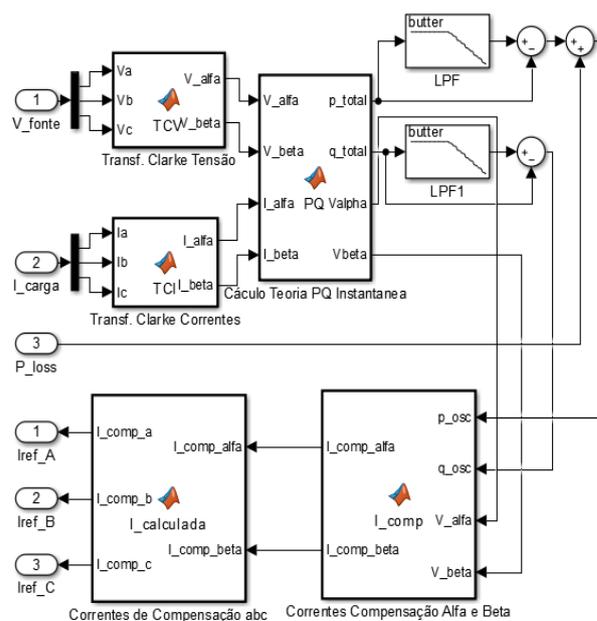


Figura 9. Diagrama de blocos do cálculo das correntes de referência (correntes de compensação)

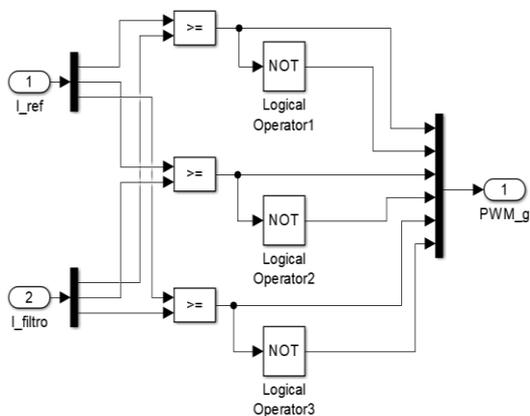


Figura 10. Diagrama de blocos para geração de PWM por banda de histerese

#### 4 Resultados do Estudo de Caso

A modelagem computacional do filtro ativo paralelo trifásico foi aplicado para três situações distintas de carga, descritas na Tabela 1 1.

Tabela 1. Estudos de Caso

Situação	Tipo de Carga
1	Não-linear
2	Linear desequilibrada
3	Não-linear e linear desequilibrada

O propósito dessa combinação de cargas é evidenciar a comparação entre a forma de onda da corrente antes e após a conexão do FAP ao sistema. Para isto, foi determinado que este fosse conectado apenas no instante  $t = 0,1$  segundo. É importante ressaltar que não apenas a presença do transitório de corrente,  $0,1 \leq t \leq 0,105$ , caracterizando um surto de corrente já esperado, devido a conexão do dispositivo ao sistema, como também a presença da corrente de referência mesmo quando o FAP está desconectado da rede são normais e não foram abrangidas nas análises, pois não é o foco do trabalho.

A título de esclarecimento, as correntes de referência existem mesmo quando o filtro está desconectado, pois são valores numéricos para o sistema de controle do chaveamento do inversor e estes variam de acordo com a corrente de saída do filtro, devido a comparação por histerese. Portanto, qualquer corrente de referência para  $t \leq 0,1$  segundo deve ser ignorada, pois não apresenta significado físico ao funcionamento do FAP, visto que este não está conectado ao sistema, logo não insere nenhuma corrente durante este intervalo.

Para analisar a eficácia do equipamento foram obtidas, por meio da simulação computacional, as correntes da fonte, de saída do filtro e a comparação da mesma com as correntes de referência. As Figuras 11 e 12, representam o comportamento dessas grandezas para a Situação 1, as Figuras 13 e 14 representam a Situação 2 e, finalmente, as Figuras 15 e 16 a Situação 3.

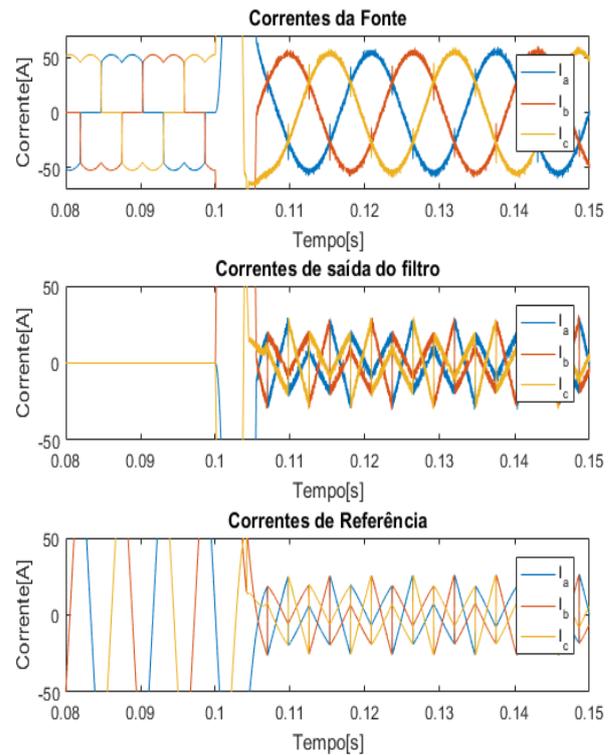


Figura 11. Correntes da Fonte, saída do filtro e de referência – Situação 1

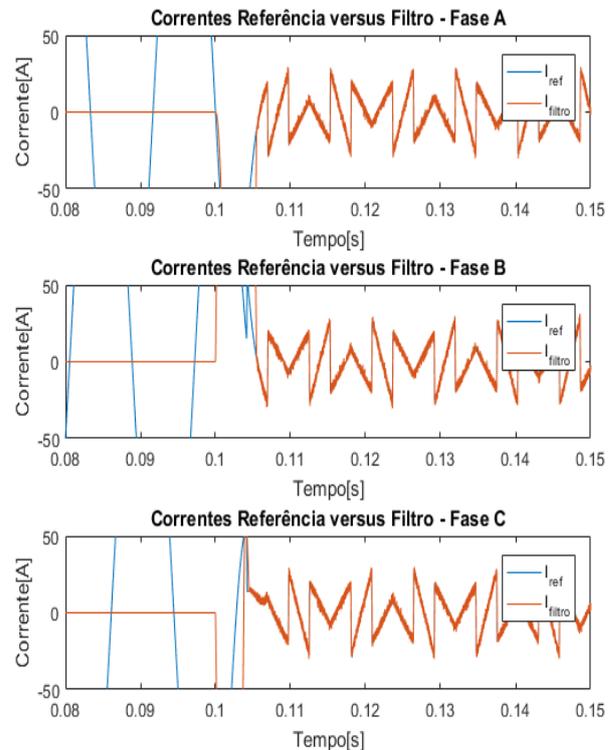


Figura 12. Comparação entre correntes de referência vs. correntes do filtro – Situação 1

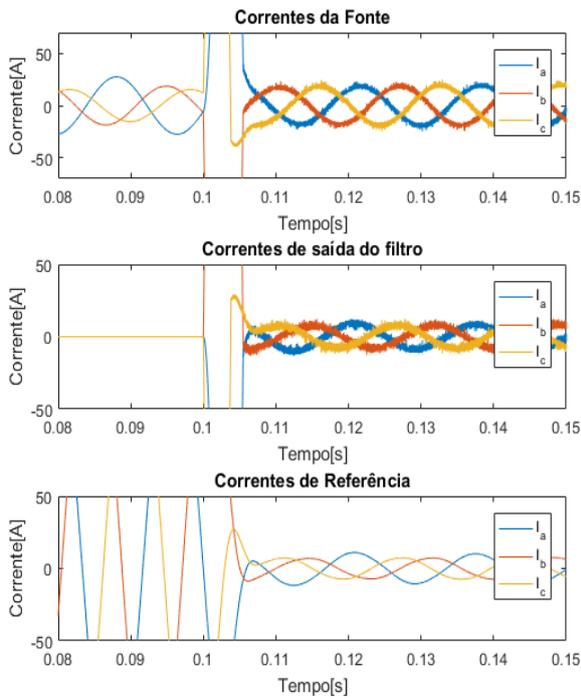


Figura 13. Correntes da fonte, saída do filtro e de referência – Situação 2

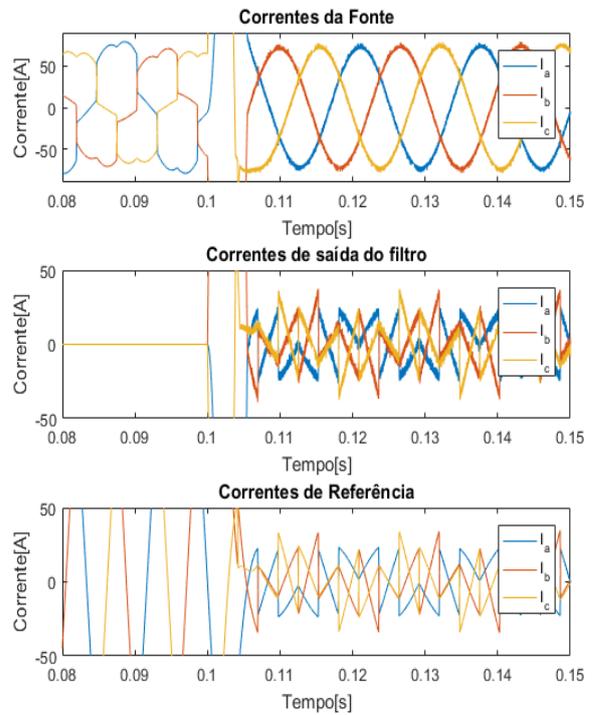


Figura 15. Correntes da Fonte, saída do filtro e de referência – Situação 3

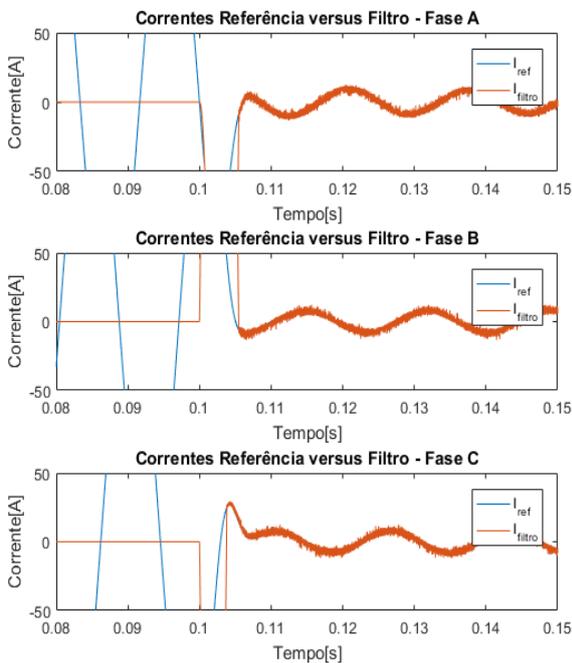


Figura 14. Comparação entre correntes de referência vs. corrente do filtro – Situação 2

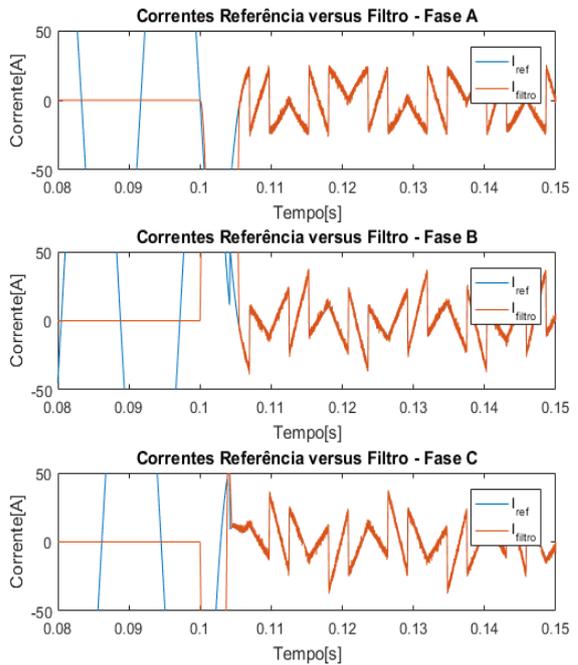


Figura 16. Comparação entre correntes de referência vs. corrente do filtro – Situação 3

Na primeira situação, é possível observar que a forma de onda da corrente da fonte antes da atuação do filtro ativo é distorcida, com distorção harmônica total de corrente ( $DHT_I$ ) de 27,62%; após o acionamento do dispositivo, a forma de onda passa a ter  $DHT_I$  de 1,042%, no entanto apresenta um ruído em alta frequência, além de alguns *spikes* de corrente.

Os sinais de alta frequência ocorrem devido à frequência de chaveamento do FAP, pois com a geração de pulsos PWM por controle a banda de histerese, não é possível controlar o chaveamento em uma

determinada frequência. Enquanto os *spikes* de corrente são dados em virtude de altos valores de  $\frac{di}{dt}$  na corrente de referência, os quais os indutores de acoplamento se opõem a variar tão bruscamente, caracterizando uma lentidão à resposta do FAP para estes casos, no entanto tanto o ruído em alta frequência e os *spikes* de corrente são efeitos normais e esperados no funcionamento do filtro ativo.

Os resultados da situação 2, que apresenta o comportamento do filtro frente a uma carga linear desequilibrada, são mostrados na figura 13. Também nessa situação, o filtro apresentou comportamento satisfatório, corrigindo o desequilíbrio da carga e fazendo com que a corrente da fonte ficasse equilibrada, com mesmo módulo e diferença angular de  $120^\circ$  entre as fases.

Na Figura 15 mostra a atuação do FAP para ambos os tipos de carga conectadas à rede, como sugere a Situação 3. A conexão do filtro reduziu a distorção total da corrente da fonte, como mostra a Figura 17, de 20,32% na fase A para 3,57%, de acordo com a Figura 18, além de corrigir o desequilíbrio explicitado também na Figura 15. Analisando, por fim, as Figuras 12, 14 e 16, é possível afirmar que o sistema de controle e a sintonização dos ganhos do PI estão adequados, visto que em todas as situações estudadas o filtro seguiu perfeitamente a referência de corrente, injetando, portanto, a corrente de compensação necessária para corrigir os dois distúrbios analisados.

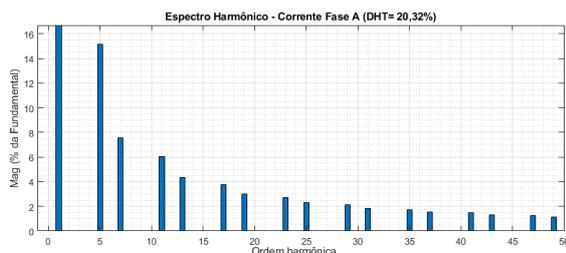


Figura 17: Espectro harmônico antes da entrada do FAP – Fase A

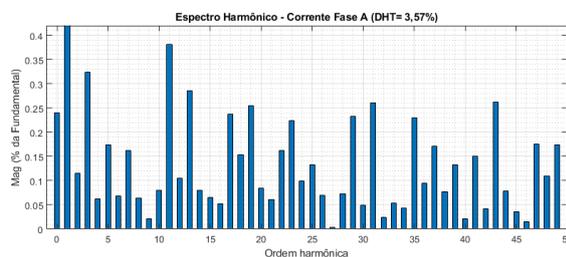


Figura 18: Espectro harmônico depois da entrada do FAP – Fase A

## 5 Conclusões

Este trabalho mostrou que a teoria da potência instantânea é crucial para a implementação do FAP, visto que esta possibilita separar todas as componentes indesejadas da forma de onda de corrente. Além disso, deve-se atentar a fatores importantes para o funcionamento do equipamento, que abrangem desde a sintonização dos ganhos do PI no controle da tensão no elo CC, pois esta interfere diretamente no cálculo de geração das correntes de referência, até ao método de geração dos pulsos para controle do chaveamento do inversor, o qual é determinante na sintonização das correntes do filtro.

Outro aspecto importante é o efeito que o filtro causa à forma de onda da corrente para diferentes tipos de carga, analisadas isoladamente e em conjunto, como foi exposto pelas situações exploradas neste trabalho. A redução considerável da distorção harmônica de corrente, possibilitando aumento indireto da capacidade do sistema, e a visível melhora na forma de onda da tensão estabelecem resultados coerentes, de acordo com a proposta do equipamento, e robustos, no que tange à eficiência e harmonia entre os componentes de potência e controle para a implementação do filtro ativo paralelo.

## Referências Bibliográficas

- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A., 1984. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 3, Maio/Junho 1984.
- Akagi, H., Watanabe, E. H., e Aredes, M., Março 2004, The PQ-Theory for Active Filter Control: Some Problems and Solutions. Revista Controle & Automação, Vol. 15, No. 1.
- Akagi, H., Watanabe, E. H., e Aredes, M. (2007). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. John Wiley & Sons. Piscataway, NJ 08854.
- Bianchin, C. G., Demonti, R., Omori, J. S., 2007. Filtro Ativo Trifásico Para Qualidade de Energia Elétrica: Compensação e Balanceamento – COPEL, Biblioteca ANEEL.
- Sousa, R. M. de, 2011. Estratégia de Controle Robusto para Filtro Ativo Paralelo sem Detecção de Harmônicos de Correntes. Dissertação de Mestrado – UFRN.
- Souza, O. C. de, Silva, S. F., 2013. Comparação entre Métodos de Sintonia de Controlador PID em Malha de Controle de Pressão. Instituto Federal Fluminense.