

Especificação de Um Filtro Ativo para Correção Instantânea do Fator de Potência para Ondas Não-Senoidais Utilizando a Teoria da Potência Complexa Instantânea

Rafael Fraco Silveira¹
Marcelo Semensato²

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás/Campus Jataí /Engenharia Elétrica – PVIC,
griphynoria@gmail.com

² Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás /Campus Jataí/Indústria – semensato@ymail.com

Resumo

As componentes harmônicas de uma onda são frequências da componente do sinal que são múltiplos inteiros da freqüência fundamental. Em sistemas de energia elétrica elas são provocadas por cargas não-lineares. O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes. Uma maneira de realizar a correção ativa do fator de potência desse tipo de distorção na onda é através de um filtro ativo, que é um tipo de filtro eletrônico analógico, distinguido dos outros pelo uso de um ou mais componentes ativos. Tipicamente este componente pode ser uma válvula termiônica, um transistor ou um amplificador operacional. A partir de estudos da Teoria da Potência Complexa Instantânea é possível elaborar um filtro ativo para a correção instantânea do fator de potência de cargas não lineares. A Teoria da Potência Complexa Instantânea é uma ferramenta matemática que permite identificar a potência reativa instantânea trifásica para a correção ativa do filtro. Inicialmente a teoria foi desenvolvida por Milanez[1] e posteriormente estudada por Semensato[5].

Palavras-chave: Potência Instantânea, Harmônicas, Filtro Ativo.

APRESENTAÇÃO

As correntes harmônicas na rede elétrica são provocadas por cargas não-lineares, como retificadores de tensão e fontes chaveadas. Essas correntes que percorrem a linha de transmissão podem afetar diversas cargas ligadas a esta rede, causando diversos danos à sua operação. As cargas sensíveis às tensões de 60 Hz, principalmente aparelhos eletrônicos, podem queimar ou ter um mau funcionamento, pois as ondas distorcidas têm componentes harmônicas de várias frequências, múltiplas da frequência fundamental. As componentes harmônicas podem ser obtidas pela decomposição em série de Fourier da onda total.

Outros efeitos da distorção harmônica são o aquecimento de cabos, do neutro da rede elétrica e de motores de indução trifásico.

Quando na linha há componentes harmônicos se torna difícil o cálculo da potência utilizando os fasores convencionais, principalmente no que se trata da definição de potência

reativa e sua correção. Por isso será estudada uma nova abordagem para esse problema utilizando a Teoria da Potência Complexa Instantânea.

A Teoria da Potência Complexa Instantânea permite o estudo da potência ativa e reativa instantânea em casos de distorção harmônica e dará base matemática para o projeto de um filtro para correção ativa do fator de potência nestes casos.

A Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) foi proposta por Milanez[1], com base na potência instantânea de Akagi[2]. A teoria de Akagi propõe a decomposição escalar das tensões e correntes trifásicas nos eixos, real e imaginário. Decompondo a corrente e tensão trifásica é possível calcular as potências ativas e reativas instantâneas da rede elétrica trifásica.

A nova teoria de Milanez[3] propõe o uso vetorial da potência instantânea de Akagi. Pelo uso vetorial é possível enxergar melhor as variações das grandezas físicas da rede elétrica. Possibilita obter a potência ativa e reativa instantânea trifásica como também a potência instantânea reativa e ativa para uma única fase tanto para sistemas equilibrados como para sistemas desequilibrados e/ou não-senoidais. É mais importante, o tema estudado por este trabalho, à correção ativa do fator de potência para ondas não-senoidais.

Esta nova abordagem permite a análise da rede trifásica com mais eficiência para componentes harmônicos. A TPCI está sendo estudada por alguns pesquisadores no intuito de implementa - lá aos poucos em disciplinas como circuitos elétricos, que tratam apenas de sistemas equilibrados e senoidais.

Espera-se também com os resultados das pesquisas desenvolvidas, de artigos publicados em congressos e eventos, consolidarem a Teoria da Potência Complexa Instantânea introduzindo seus conceitos na disciplina de circuitos elétricos do IFG - Jataí.

OBJETIVOS

Ampliar as aplicações da Teoria da Potência Complexa Instantânea, bem como usá-la para a elaboração de um filtro ativo que possa realizar correções do fator de potência nas redes de transmissão relacionadas às distorções de onda. Analisar as componentes harmônicas e seus efeitos em sistemas trifásicos pela nova teoria.

Uma das principais utilidades desta nova ferramenta matemática é a simplicidade de operação e a eficácia dos resultados. Na análise das componentes harmônicas pela teoria é possível identificar as potências ativa e reativa instantâneas envolvidas, elaborar relés de distância mais eficientes para o sistema trifásico, visualizar os efeitos causados no sistema elétrico de potência provocados por essas componentes harmônicas e detectar os disturbios em cargas trifásicas, como por exemplo, o motor de indução.

METODOLOGIA

A princípio o projeto foi desenvolvido pelo método dedutivo onde há a possibilidade de obter dados relevantes sobre as distorções nas ondas e do efeito harmônico na rede elétrica, uma vez que são fatores importantes a serem estudados.

Posteriormente realizou um estudo detalhado sobre a Teoria da Potência Complexa Instantânea de Milanez[1]. O entendimento desta teoria permite uma análise mais eficaz das grandezas da rede elétrica trifásica, fornecendo a base matemática para a correção do fator de potência instantâneo desta rede. A parte prática, primeiramente, aborda o estudo de uma carga não-linear pela nova teoria. Pela análise da carga foram obtidas diversas grandezas da rede

trifásica, entre a quais, as potências, ativa e reativa instantânea trifásica, as correntes instantâneas, as componentes harmônicas e seus efeitos na rede elétrica.

Essas grandezas relacionadas à carga não-linear são obtidas por simulação através do software Simulink do MatLab. Os resultados obtidos serão analisados teoricamente.

Após o estudo da TPCI iniciou-se o estudo do filtro ativo para correção instantânea do fator de potência que está em fase de desenvolvimento com o intuito operar de acordo com lógica matemática proposta pela teoria.

O filtro ativo pode ser estudado em diversas bibliografias, dentre as quais o filtro ativo desenvolvido por Akagi[2]. Os estudos propostos por Akagi servem como base para o projeto do filtro ativo.

O filtro ativo será simulado por software e os resultados serão analisados teoricamente.

RESULTADOS

1. HARMÔNICAS

Harmônica nada mais é do que a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica, 60 Hz). As harmônicas são um fenômeno contínuo e não devem ser confundidas com fenômenos de curta duração.

Quando se aplica uma tensão senoidal a uma carga linear, toda a corrente flui na frequência fundamental do respectivo sistema de fornecimento CA. Desse modo um sistema de 60 Hz produzirá somente uma corrente com 60 Hz em uma carga linear.

Porém, quando se trata de uma carga não-linear essa situação modifica radicalmente, sua linha de curva faz com que a aplicação de tensão de 60 Hz gere uma corrente com mais de uma frequência, sendo essas frequências múltiplos inteiros da frequência do sistema CA. Essas correntes são chamadas harmônicas. Com este tipo de carga não é possível fazer uma previsão sobre a relação corrente-tensão como é feita para cargas lineares.

Ondas periódicas não-senoidais podem ser decompostas em uma série infinita de ondas senoidais com magnitude e ângulos de fases a partir da Série de Fourier, conforme mostrado pela figura 1, sendo a primeira componente a fundamental, as outras componentes sendo frequências múltiplas desta e uma componente CC para complemento, mostrada pela figura 2.

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n)$$

y_0 = valor da componente CC, geralmente nulo
 y_n = valor eficaz da componente harmônica de ordem "n"
 ω = frequência angular da fundamental
 φ_n = defasagem da componente harmônica de ordem "n"

Figura 1: Série de Fourier para decomposição de harmônicas

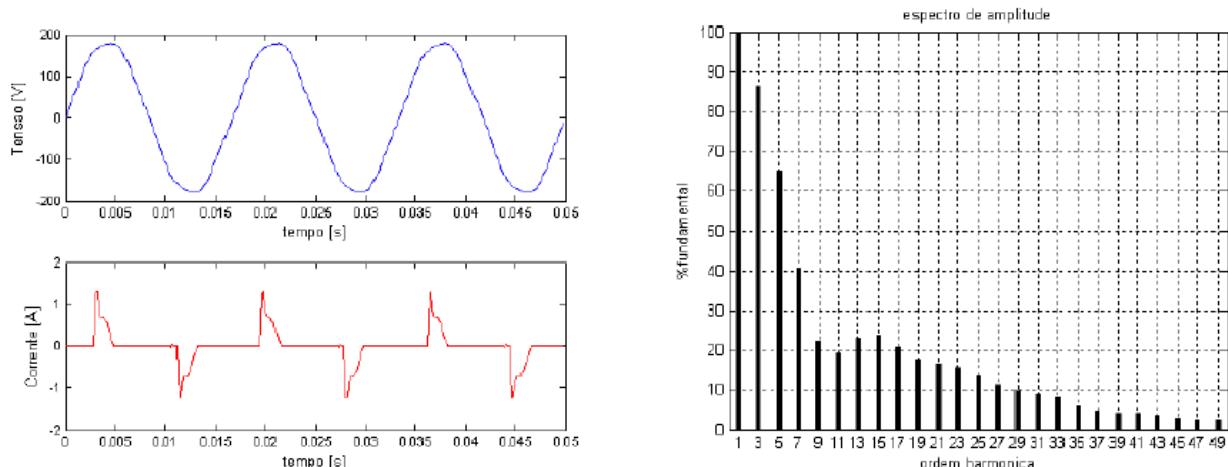


Figura 2: Exemplo da onda não-senoidal decomposta e seu espectro de uma LFC

Ondas não-senoidais simétricas geram apenas componentes de ordem ímpar, como pode ser visto no espectro acima. Aparelhos convencionais não medem o valor RMS verdadeiro de harmônicas, mas há aparelhos de medição modernos que utilizam essa decomposição acima para obter este valor além dos espectros.

Essa onda gerada pelas cargas não-lineares afeta completamente o sistema elétrico, distorcendo a onda de corrente. A onda de corrente distorcida percorre todo o circuito e provoca quedas de tensões não-lineares nas impedâncias de linha afetando outras cargas (figura 3).

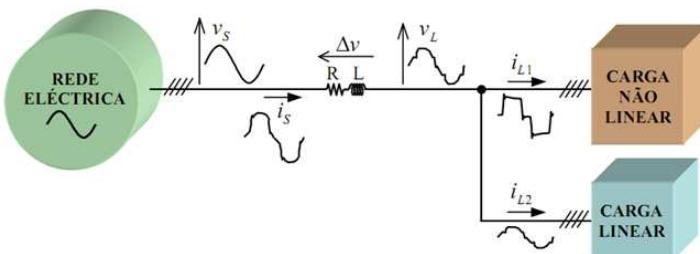


Figura 3: Rede Elétrica comprometida pela ação de uma carga não linear

Como pode ser verificado acima há uma completa deteriorização do sistema acarretando no surgimento de diversos efeitos:

- Correntes no neutro devido presença de 3ª harmônica;
- Perdas por Efeito Skin;
- Aumento das perdas nos condutores por Efeito Joule;
- Vibração em máquinas;
- Erros de medição dos aparelhos tradicionais;
- Atuação de réles e disjuntores indevidamente;
- Queima de motores de indução;
- Danificação de capacitores destinados a correção de FP;
- Mau funcionamento de equipamentos sensíveis.

2. NORMATIZAÇÃO

Existem alguns parâmetros que podem ser estabelecidos a fim de controlar a presença de harmônicos. Pode-se destacar 2 importantes normas internacionais para controle e cálculo das harmônicas, a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519-1992.

A IEC 61000-3-2 trata da limitação de correntes harmônicas (<16 A por fase) injetadas no sistema de abastecimento público além de especificar os limites das componentes harmônicas da corrente de entrada que podem ser produzidos pelo equipamento testado sob condições específicas. Essa parte da IEC 61000 é aplicável aos equipamentos elétricos e eletrônicos, com uma corrente de entrada até e incluindo 16 A por fase, e destinado a ser ligado a sistemas de distribuição pública de baixa tensão.

A IEEE 519 é um conjunto de recomendações para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência e indica métodos de medição e limites de distorção. Os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (*point of common coupling - PCC*), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Apesar de não haver uma normatização brasileira quanto ao controle da qualidade de energia, possui-se uma série de recomendações como os Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST 8 – qualidade de energia elétrica. Onde se propõe valores para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição.

Tabela 1: Valores de referência globais das distorções harmônicas totais em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST 8

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT)[%]
$V_n \leq 1kV$	10
$1kV < V_n \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_n \leq 69kV$	6
$69kV < V_n \leq 138kV$	3

Para a rede básica de energia, o Operador Nacional do Sistema (ONS) estabelece desde 2002 parâmetros de qualidade para a tensão suprida.

Mas, do ponto de vista do consumidor, as restrições a serem consideradas são, na imensa maioria, as do sistema de distribuição, as quais ainda estão em discussão.

3. CORREÇÃO PARA SISTEMAS HARMÔNICOS

Quando se fala em correção de sistemas elétricos logo se recorre à teoria de potência ativa e reativa convencional, entretanto quando realizado um estudo mais detalhado sobre a mesma mostra que esta tem sua validade física confirmada apenas em sistemas que operam em regime permanente e sem distorções, em monofásico, e ainda balanceado no caso do trifásico, como descrito por Watanabe[7].

Dito isto, temos problemas recorrentes a essa situação uma vez que inicialmente essa teoria foi desenvolvida para sistemas monofásicos e depois reestruturada para sistemas trifásicos

como se este último comporta-se como se fosse três sistemas monofásicos, logo ignorando o acoplamento das fases. Outra situação é que essa idéia de potência reativa surgiu embasada em elementos indutivos e capacitivos, onde considera que a potência reativa está ligada ao armazenamento de energia, o que pode ser facilmente quebrada ao analisarmos um circuito simples de controle de luminosidade composto de um dimmer em uma lâmpada incandescente. E finalmente a teoria convencional deriva em base de fasores e valores eficazes caracterizando uma técnica desenvolvida para apenas uma frequência, segundo Watanabe[7]. Logo como se trata de casos onde verifica a existência de diversas frequências no sistema seria errôneo utilizar tal teoria.

Em casos como esse podemos utilizar a Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantâneas, teoria p-q, de Akagi[2], a qual propõe a decomposição escalar das tensões e correntes trifásicas nos eixos real e imaginário. Decompondo a corrente e tensão trifásica é possível calcular as potências ativas e reativas instantâneas da rede elétrica trifásica permitindo responder de uma forma eficaz e dinâmica às situações de distorções e de desequilíbrio em sistemas elétricos.

A base da correção está nos filtros ativos de potência, que nada mais são que sistemas eletrônicos de potência instalados em série ou paralelo com a carga não-linear, visando compensar seja as tensões harmônicas, seja correntes harmônicas geradas pela carga.

Os filtros atuam através de um processo de aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não-linear, promovendo a compensação reativa. Ele é composto por um inversor de corrente e um controlador.

O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões e correntes na carga, produz as correntes de compensação de referência para o inversor. O inversor, por sua vez, injeta as correntes de compensação requeridas pela carga de forma que as correntes nas fases da rede elétrica passam a ser senoidais e equilibradas (figura 4).

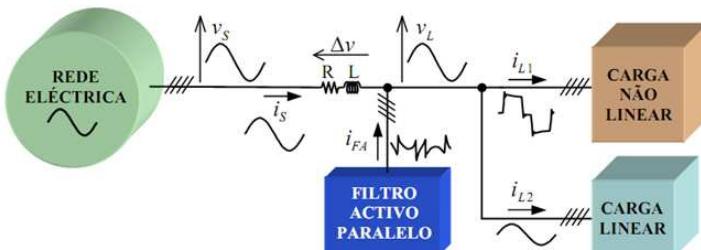


Figura 4: Exemplo de filtro ativo paralelo a rede elétrica para correção de harmônicas

Outra teoria que pode ser destacada é a Teoria da Potência Complexa Instantânea, objetivo desde trabalho, de Milanez[1], que define a potência complexa a cada instante de tempo, baseada na transformação vetorial de um sistema trifásico (a-b-c) em um sistema bifásico (α e β).

4. TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA

A teoria pode ser interpretada pela teoria de Akagi[2] que propõe a potência ativa e reativa instantânea com base na transformação de Clarke(1943).

A transformação de Clarke faz a transformação algébrica de um sistema de três fases (a,b,c) para um sistema de duas fases ortogonais (α , β) estacionárias, fazendo coincidir a fase α com a fase a (de referência). A transformação de Clarke é mostrada na figura 5a.

Milanez[1] usa a definição de vetor espacial instantâneo (VEI) no plano complexo α - β , para sistemas trifásicos sem o neutro, pela expressão da figura 5b.

$$\begin{bmatrix} v_o \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (a)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (b)$$

Figura 5: Transformada de Clarke e Transformada do sistema $\alpha-\beta$ para sistema a-b-c.

O vetor espacial instantâneo tensão \tilde{V} é definido por:

$$\tilde{V} = \frac{2}{3}(v_a + av_b + a^2v_c)$$

O vetor espacial instantâneo tensão \tilde{I} é definido por:

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c)$$

Sendo $a = 1|120^\circ$.

Abaixo vemos os vetores em um determinado momento de tempo

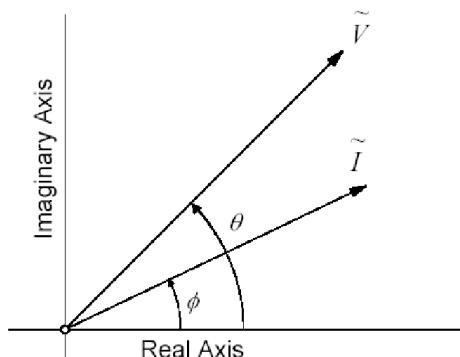


Figura 6: VEI's no plano complexo

A potência complexa instantânea é definida por:

$$S = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}^* = P + jQ \quad (VA) \quad \left\{ \begin{array}{l} P = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \cos \phi \quad (W) \Leftrightarrow P = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}_p| \\ Q = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \sin \phi \quad (Var) \Leftrightarrow Q = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}_q| \end{array} \right.$$

Onde Q é a potência que deve ser corrigida e \tilde{I}_q , que está em quadratura com \tilde{V} , é a corrente a ser corrigida. As correntes i_a , i_b e i_c de compensação são obtidas pela transformada inversa.

5. SIMULAÇÕES

Nas simulações objetivava-se entender como a TPCI trabalhava então partimos do diagrama proposto por Semensato[5], conforme figura 7.

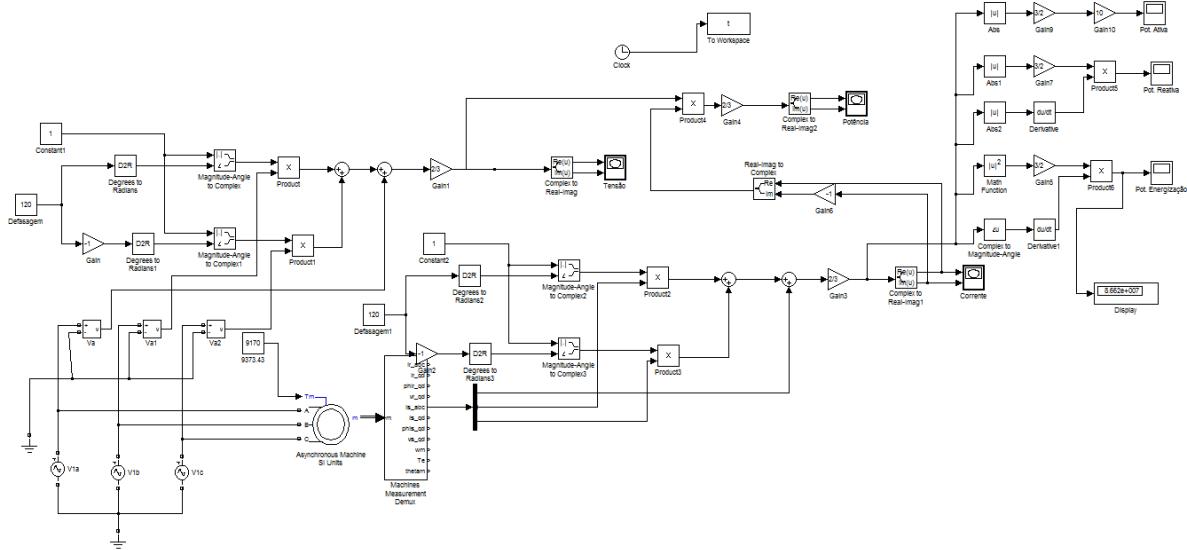


Figura 7: Programa simulado para obtenção das grandezas a partir da TPCI utilizando um motor de indução trifásico

Nesse diagrama pode-se entender um pouco melhor como trabalhar com a TPCI e a forma com que as grandezas elétricas são obtidas e seus valores conforme demonstra a figura 8.

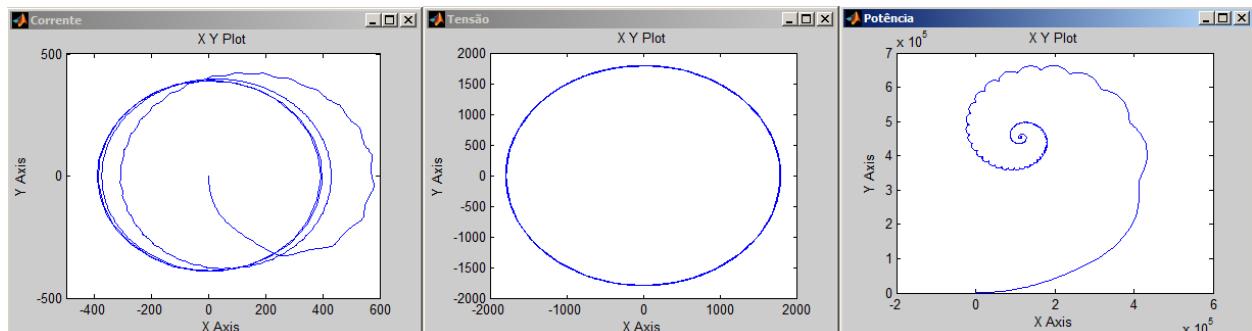


Figura 8: Grandezas elétricas – Corrente, Tensão e Potência Aparente

Também observamos as ondas transitórias das potências complexas instantâneas, ativa e reativa conforme vemos na figura 9.

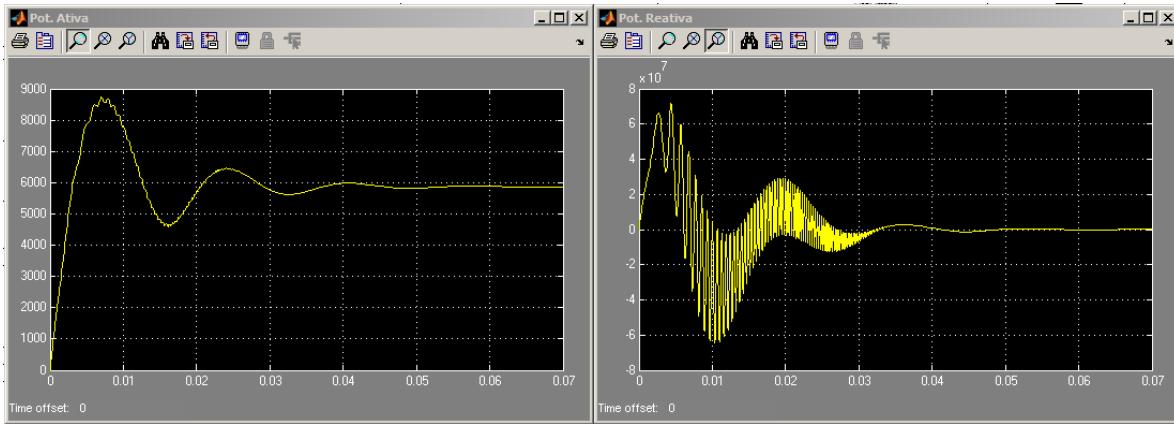


Figura 9: Potências Complexas Instantâneas, Ativa E Reativa

Em seguida foi simulada a TPCI com uma carga linear, contudo realizando a defasagem do sistema nas fontes de tensão de entrada conforme figura 10.

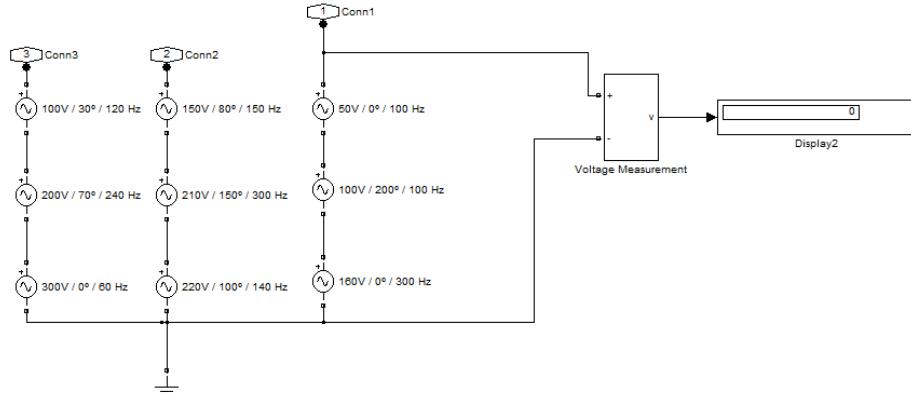


Figura 10: Fontes de tensão

A nova tela de trabalho estabelecida foi representada pela figura 11.

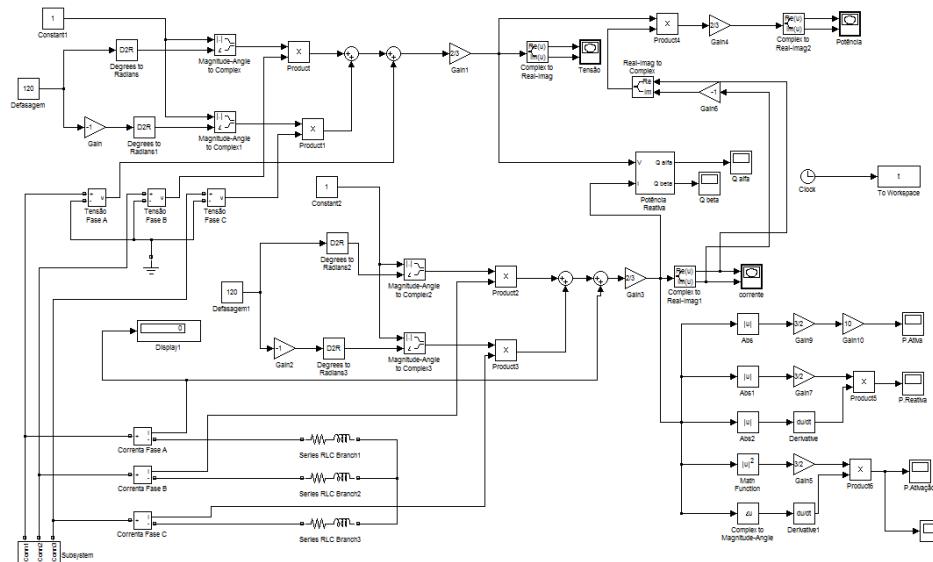


Figura 11: Programa simulado para obtenção das grandezas a partir da TPCI, utilizando cargas lineares

As grandezas de tensão e corrente sofreram uma mudança comparada a tela inicia, a qual pode ser observada pela figura 12.

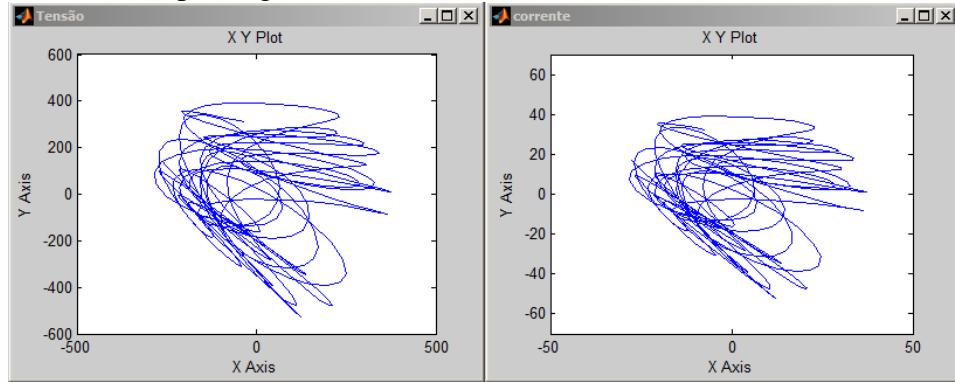


Figura 12: Grandezas elétricas – Corrente e Tensão

Nesse ponto pode ver claramente a influência das harmônicas atuando no sistema, visto que em uma fonte simétrica observamos que a tensão mantém seu padrão durante todo tempo em que alimenta o sistema. A corrente, por sua vez, na primeira simulação, figura 8, passa por um período transitório até estabelecer-se, na segunda simulação, figura 12, a mesma sofre ação da tensão harmônica fornecida pela fonte e também se distorce.

As potências complexas instantâneas, ativa e reativa, no período transitório são vistas na figura 13.

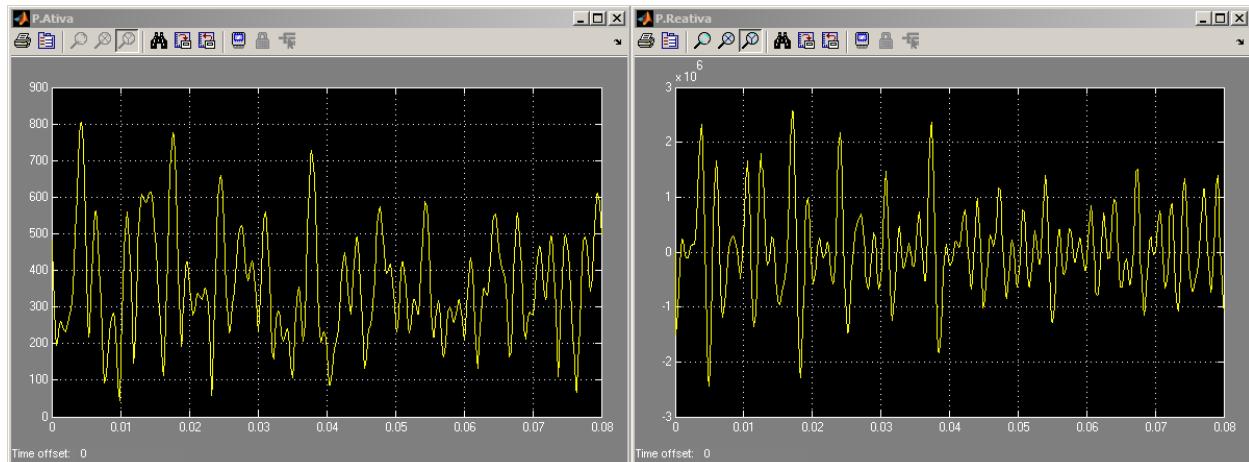


Figura 13: Potências Complexas Instantâneas, Ativa E Reativa

Elaborou-se o Bloco Potência Reativa para dividir a respectiva potência em suas componentes α e β (figura 14 e 15). Neste bloco proposto por Semensato[5] também podemos retirar o fator de potência do sistema.

Espera-se a partir desse bloco poder elaborar o filtro ativo utilizando a TPCI.

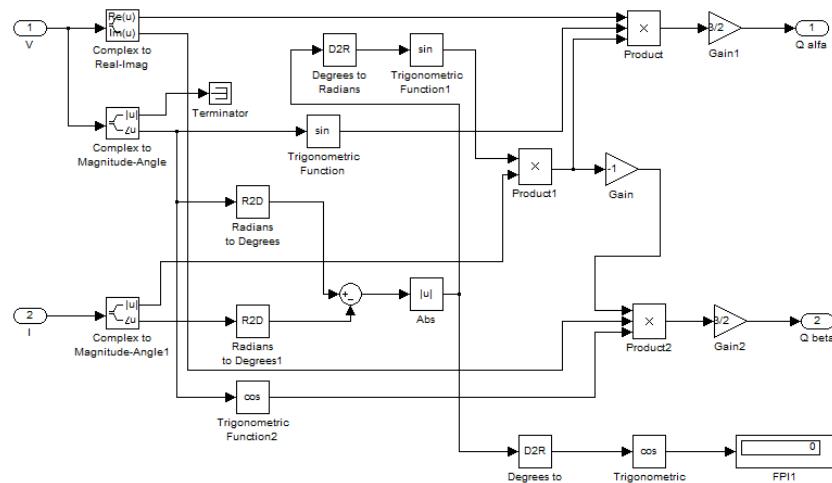


Figura 14: Bloco Potência Reativa

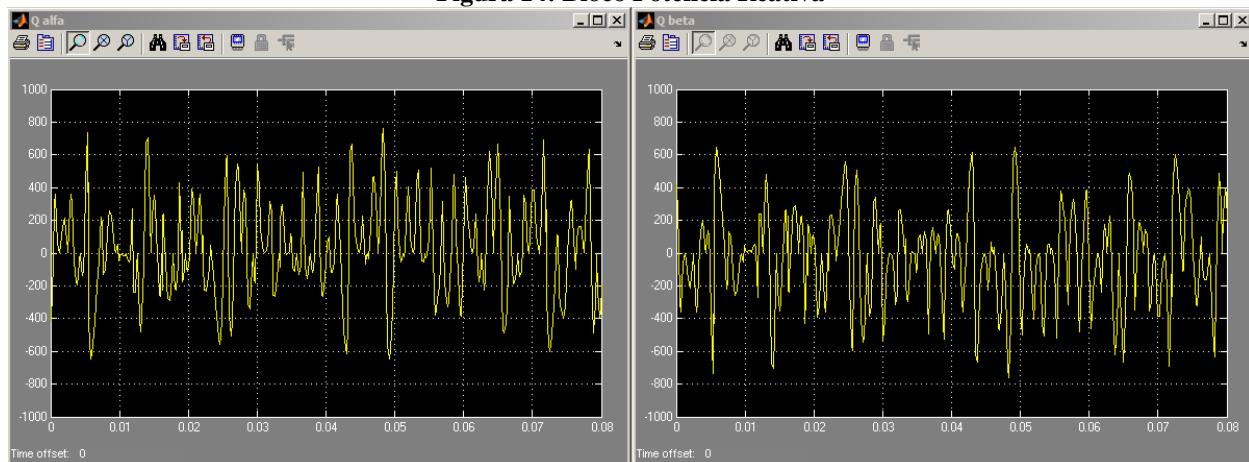


Figura 14: Leitura das componentes α e β da potência complexa instantânea reativa

CONCLUSÃO

Apesar do objetivo principal deste projeto de IC ser a especificação do filtro ativo, verificou-se a necessidade de um melhor entendimento sobre o comportamento das harmônicas nos sistema elétrico e como ela influencia as grandezas elétricas.

Também era necessário um maior entendimento do orientando entender as teorias envolvendo todo o processo de correção, grandezas de Buchholz-Goodhue, teoria p-q, cálculos das distorções harmônicas e a teoria da potência complexa instantânea.

No ponto atual em que se encontra o trabalho já é possível vislumbrar a especificação e elaboração do filtro, trabalho que está sendo iniciado, uma vez que o projeto terá continuação até alcançar este objetivo.

Segunda as expectativas iniciais de trabalho estamos dentro do cronograma estabelecido, o que deve ser entendido é: como este projeto utiliza muitos conceitos avançados com relação à potência, alguns os quais são estudados apenas em mestrado, há a necessidade de que o orientando busque muitas informações, algumas que somente é de conhecimento nos períodos finais do curso de Engenharia Elétrica, então a velocidade com que o projeto avança também depende do andamento do curso citado.

Por fim a TPCI demonstrou-se muito versátil quanto a sua utilização na análise dos transitórios tanto para sistemas equilibrados quanto para desequilibrados, quando se fala em perdas de linha utilizar as grandezas de Buchholz-Goodhue (Semensato[5]).

Procuramos abrir também uma discussão sobre o modelo de estudo da potência elétrica dentro do curso de Engenharia Elétrica, pois é necessário que o graduando já tenha conhecimento sobre essas novas vertentes no estudo da mesma, preparando-o melhor para o mercado de trabalho, tendo em vista que estes alunos podem se deparar com situações em que seja necessário trabalhar com tais teorias para resolução de problemas reais.

Durante o estudo constatou-se a presença de outro tipo de potência no sistema elétrico a qual denominamos de potência de energização que segundo demonstrações matemáticas pode se tratar de uma parte da potência ativa sendo consumida por componentes indutores do sistema. Esta é uma parcela da potência que aparece oscilando dentro do sistema transitório, cuja qual está tentando-se entender, entretanto ainda sem sucesso.

BIBLIOGRAFIA

- [1] MILANEZ, D.L.; MISKULIM, M.S. The instantaneous complex power applied to three-phase machines, 28IAS, 1993, Toronto. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING IEEE. Annual Meeting... Toronto: IEEE, 1993. p. 171-176.
- [2] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. (1983). Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. In: PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 1983. Proceedings of the IPEC'83... Tokio: IEEE, 1983. p. 1375-1386.
- [3] MILANEZ, D. L.; ESTEVAM, G. P. Análise de um retificador trifásico de onda completa a tiristor aplicando a teoria da potência complexa instantânea. In: III CONGRESSO LATINO AMERICANO DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, CONLADIS, 3, 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: S.n., 1998. p. 419-423.
- [4] DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, W. H. Electrical power systems quality. New York: McGraw-Hill, 1996. 256 p.
- [5] SEMENSATO, M.; Aplicações da Teoria da Potência Complexa Instantânea no Cálculo das Grandezas de Buchholz-Goodhue. 2007. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- [6] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEEE Press, 2007. 379p.
- [7] WATANABE, E. H. ; AREDES, M. . Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e Facts. In: CBA'98 - XII BRAZILIAN AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE, 1998, Uberlândia, MG. Mini-Curso, 1998. v. 1. p. 81-122.
- [8] AKAGI, H. ; WATANABE, E. H. ; AREDES, M. . Instantaneous Power Theory and Applications to Power conditioning. 1. ed. Nova Iorque: IEEE Press / Wiley Interscience, 2007. v. 1. 400p
- [9] AREDES, M. ; WATANABE, E. H. ; H. Akagi . The p-q Theory for Active Filter Control: Some Problems and Solutions. In: XIV CONGRESSO DE AUTOMÁTICA, 2002, Natal. Proc. (CDROM) of the CBA, 2002. v. 1. p. 1078-1083.