



INSTITUTO FEDERAL  
GOIÁS

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
DEPARTAMENTO DE PESQUISA E INOVAÇÃO

## **RELATÓRIO FINAL**

### **“SIMULAÇÃO DE FILTRO ATIVO PARA CORREÇÃO INSTANTÂNEA DO FATOR DE POTÊNCIA PARA ONDAS NÃO-SENOIDAIIS UTILIZANDO A TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA”**

**NOME DO BOLSISTA: RAFAEL FRANCO SILVEIRA**

**NOME DO ORIENTADOR: MARCELO SEMENSATO**

**DATA DE INGRESSO COMO BOLSISTA (MÊS/ANO): AGO/2011**

**NOME DO CURSO: ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PERÍODO QUE ESTÁ CURSANDO: 8º**

**É BOLSISTA DE RENOVAÇÃO: ( ) SIM (X) NÃO**

JATAÍ, JULHO DE 2012

## 1 – Identificação do Projeto e Componentes

Título do Projeto: *Simulação De Filtro Ativo Para Correção Instantânea Do Fator De Potência Para Ondas Não-Senoidais Utilizando A Teoria Da Potência Complexa Instantânea*

Bolsista: *Rafael Franco Silveira*

Orientador: *Marcelo Semensato*

Local de execução: *Câmpus Jataí*

Vigência: *Agosto 2001 à Julho 2012*

## 2 – Introdução

Dando continuidade ao trabalho já pesquisado procurar-se-á desenvolver novas técnicas de monitoramento da rede elétrica utilizando os novos conceitos de potência e a possível elaboração de um modelo de filtro ativo para simulação com base nas teorias conhecidas.

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 está sendo estudada uma nova abordagem para esse problema utilizando a Teoria da Potência Complexa Instantânea.

A Teoria da Potência Complexa Instantânea de Milanez[1] permitirá 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 têm como base a potência instantânea de Akagi[2]. A Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea 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 Teoria da Potência Complexa Instantânea de Milanez[1] 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. E mais importante, o tema estudado por este trabalho, à correção ativa do fator de potência para ondas não-senoidais.

Esta nova abordagem permite uma eficaz análise da rede trifásica para componentes harmônicos. A Teoria da Potência Complexa Instantânea está sendo estudada por alguns pesquisadores no intuito de implementá-la 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 – Campus Jataí.

## 3 - Material e Métodos

### 3.1 Materiais:

- Software MatLab/Simulink. (MathWorks, EUA).
- Artigos Científicos.

### 3.2 Métodos:

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 1).

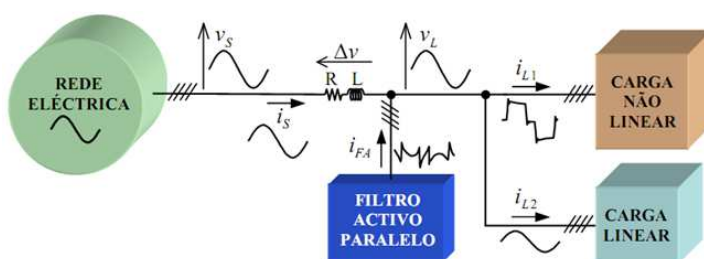


Figura 1: Exemplo de filtro ativo paralelo a rede elétrica para correção de harmônicas

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 ( $\alpha$  e  $\beta$ ).

### 3.2.1 Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea (Teoria P-Q)

Como mencionado anteriormente esta teoria propõe o desenvolvimento de filtros ativos de potência que permitem responder, de uma forma eficaz e dinâmica, às situações de distorções e de desequilíbrio em sistemas elétricos. Para o estudo matemático, Akagi[2], realizou a transformação dos sistema estacionário a-b-c para um sistema de coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ .

Tal transformação é conhecida como Transformada de Clark[5], transformação algébrica de um sistema de três fases (a,b,c) para um sistema de duas fases ortogonais ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) estacionárias, fazendo coincidir a fase  $\alpha$  com a fase a (de referência). A equação 1 demonstra a transformação das tensões entre os dois sistemas. A transformação de corrente é obtida de forma análoga.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \leftrightarrow \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

O cálculo das potência é feito neste novo referencial, cujo qual fornece p (ativa) e q (reativa) instantâneas, conforme descritas nas euações 2 e 3.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = \bar{p} + \tilde{p} (W) \begin{cases} P_{\alpha\tilde{p}} = \frac{v_\alpha^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p} = v_\alpha i_{\alpha\tilde{p}} \\ P_{\beta\tilde{p}} = \frac{v_\beta^2}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \tilde{p} = v_\beta i_{\beta\tilde{p}} \end{cases} \quad (2)$$

$$q = v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} (Var) \quad (3)$$

Onde q (potência reativa) e  $\tilde{p}$  (potência ativa oscilante) são as potências a serem corrigida e  $i_{\alpha\tilde{p}}$ ,  $i_{\beta\tilde{p}}$ ,  $i_{\alpha\tilde{q}}$  e  $i_{\beta\tilde{q}}$  são as correntes a serem compensadas. Para tal estas são corvetidas para o sistema a-b-c e invertidas para serem injetadas no sistema.

### 3.2.2 Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI)

A teoria pode ser interpretada pela teoria de Akagi[2] que propõe a potência ativa e reativa instantânea com base na transformação de Clarke[5].

Milanez[1] usa a definição de vetor espacial instantâneo (VEI) no plano complexo  $\alpha$ - $\beta$ , para sistemas trifásicos sem o neutro. Abaixo está a conversão idealizada:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

O vetor espacial instantâneo tensão  $\tilde{V}$ , equação 5, é definido por:

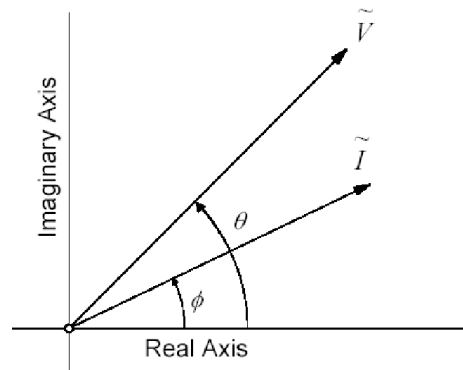
$$\tilde{V} = \frac{2}{3}(v_\alpha + \alpha v_\beta + \alpha^2 v_c) \quad (5)$$

O vetor espacial instantâneo corrente  $\tilde{I}$ , equação 6, é definido por:

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_\alpha + \alpha i_\beta + \alpha^2 i_c) \quad (6)$$

Sendo  $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ .

Abaixo vemos os vetores em um determinado momento de tempo (Figura 2).



**Figura 2: VEI's no plano complexo**

A potência complexa instantânea é definida pela equação 7.

$$S = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I} = P + jQ \text{ (VA)} \begin{cases} P = \frac{3}{2} |V| |I| \cos \varphi \text{ (W)} \Leftrightarrow P = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}_p| \\ Q = \frac{3}{2} |V| |I| \sin \varphi \text{ (Var)} \Leftrightarrow Q = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}_q| \end{cases} \quad (7)$$

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 compensada. Para tal esta corrente é corvetida para o sistema a-b-c e invertida para ser injetada no sistema.

#### 4 – Resultados

As teorias foram simuladas com uma carga linear, contudo realizando a defasagem do sistema nas fontes de tensão de entrada. Assim as grandezas de tensão e corrente sofrem uma distorção.

Abaixo estão as telas, figuras 3, 4 e 5, utilizadas para simulação das teorias.

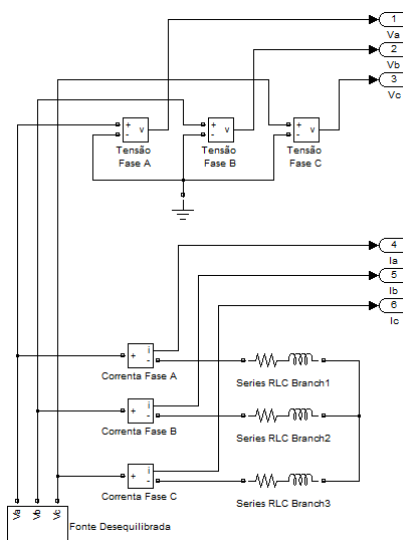


Figura 3: Simulação utilizando uma carga linear e fonte desequilibrada

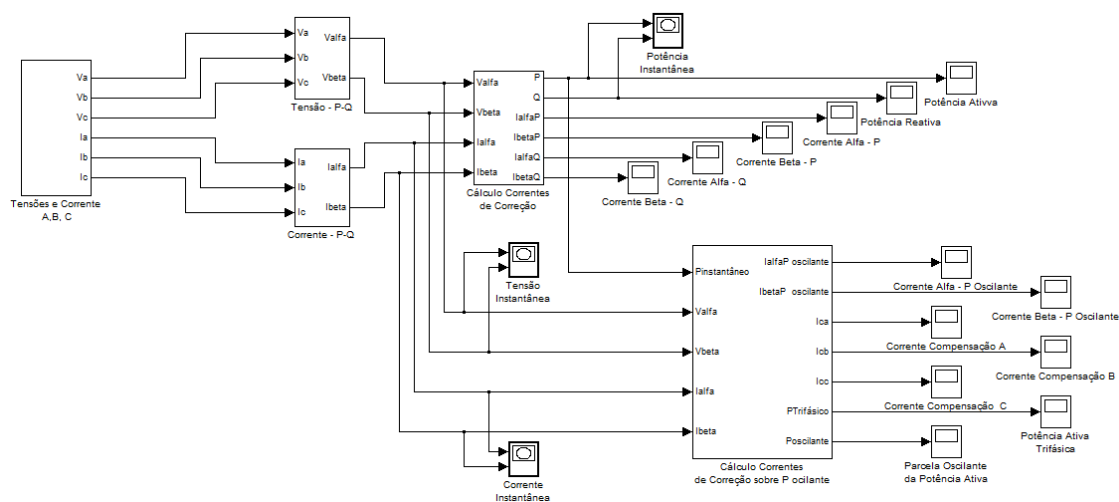


Figura 4: Tela simulada para obtenção das grandezas a partir da Teoria P-Q utilizando uma carga linear

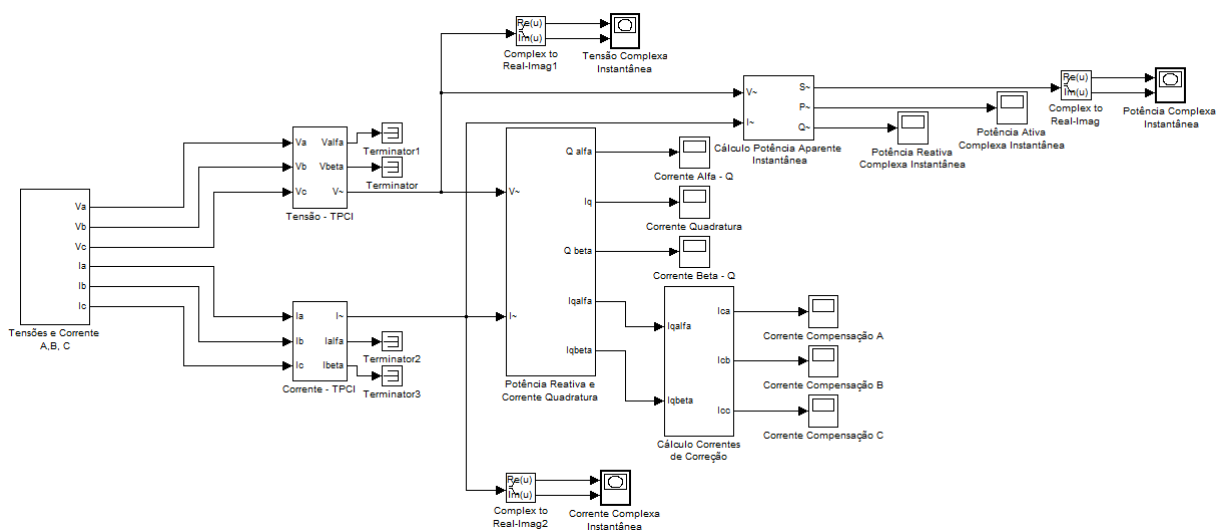
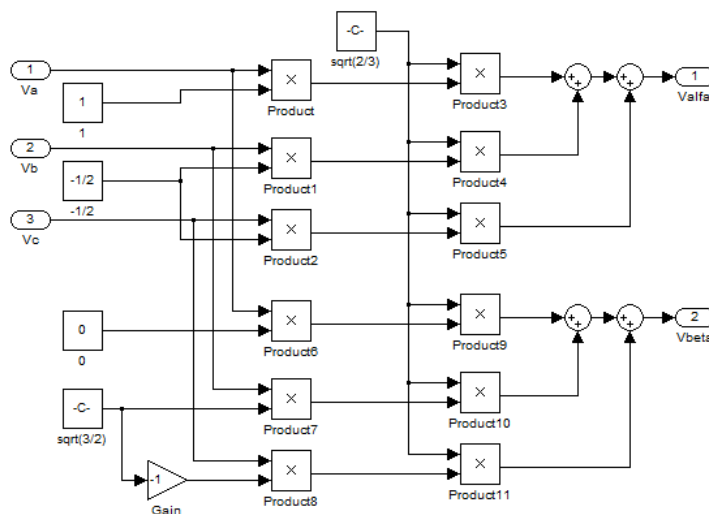


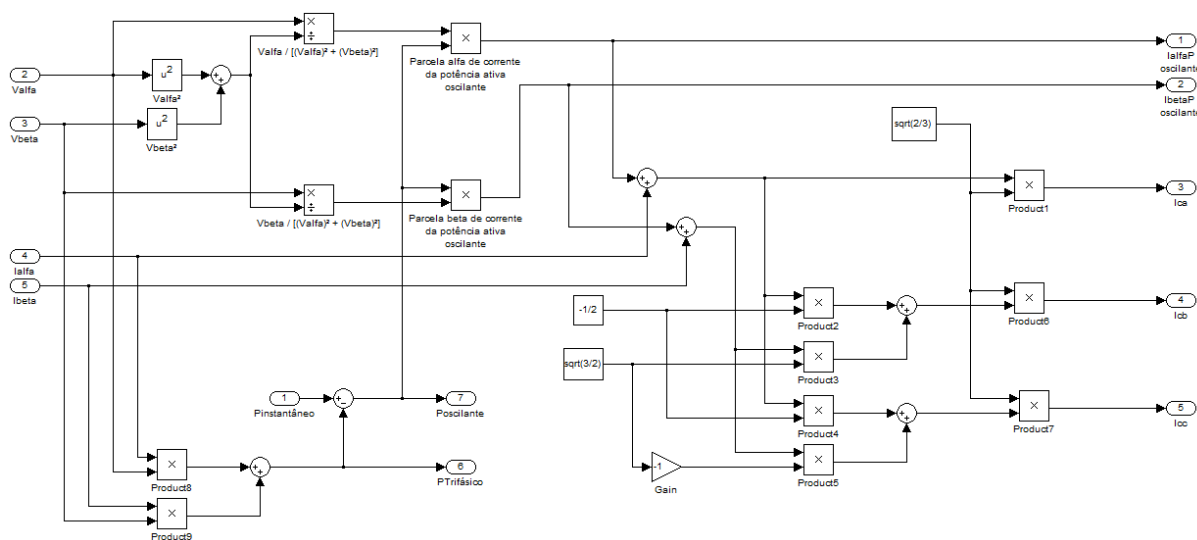
Figura 5: Tela simulada para obtenção das grandezas a partir da TPCI utilizando uma carga linear

Com a ajuda destas telas nesse buscamos comparar os resultados apresentados das correntes que devem ser corrigidas por ambas e verificar se os resultados são próximos. A seguir será colocada uma série de tela que retraram as simulações.

Primeiramente seguem as telas referentes ao trabalho feito com a Teoria P-Q (figuras 6 e 7):

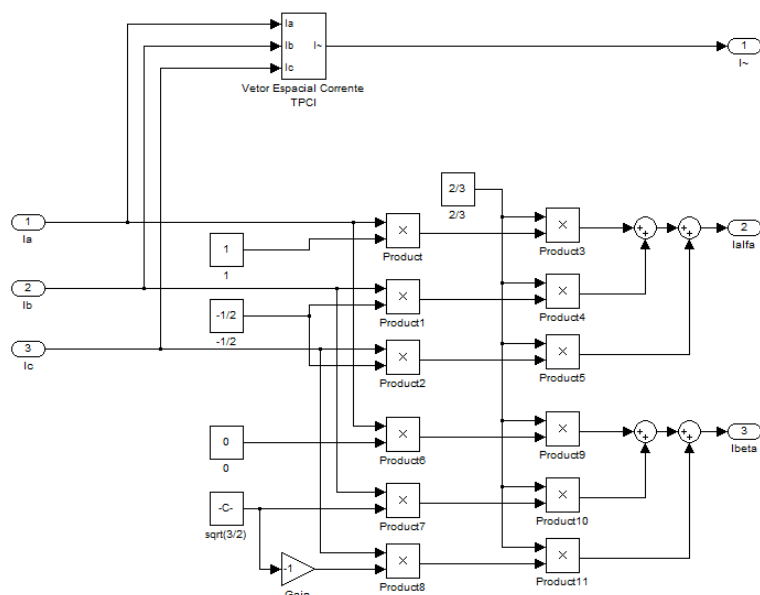


**Figura 6: Transformação das tensões do sistema ABC para sistema  $\alpha$ - $\beta$ , analogamente obtêm-se as correntes**

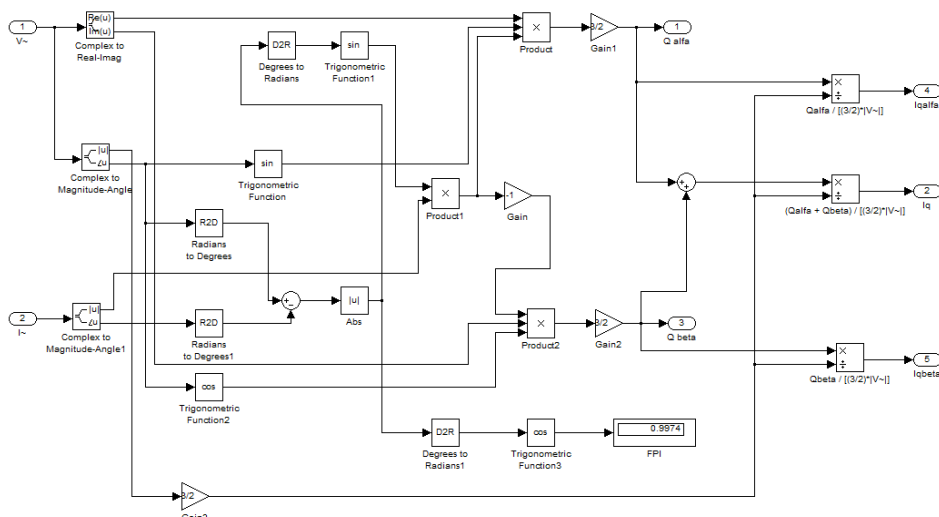


**Figura 7: Cálculo das correntes a serem compensadas no sistema e realizada a transformação inversa ( $\alpha$ - $\beta$  para ABC)**

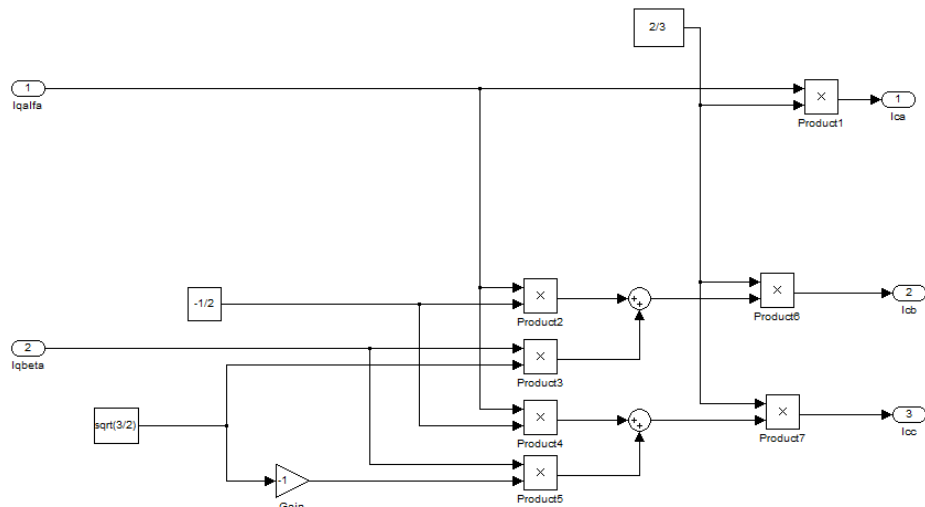
Agora seguem as telas referentes ao trabalho feito com a Teoria da Potência Complexa Instantânea (figuras 8, 9 e 10):



**Figura 8: Transformação das correntes do sistema ABC para sistema α-β, analogamente obtêm-se as tensões**



**Figura 9: Cálculo da Corrente de Quadratura e suas componentes**

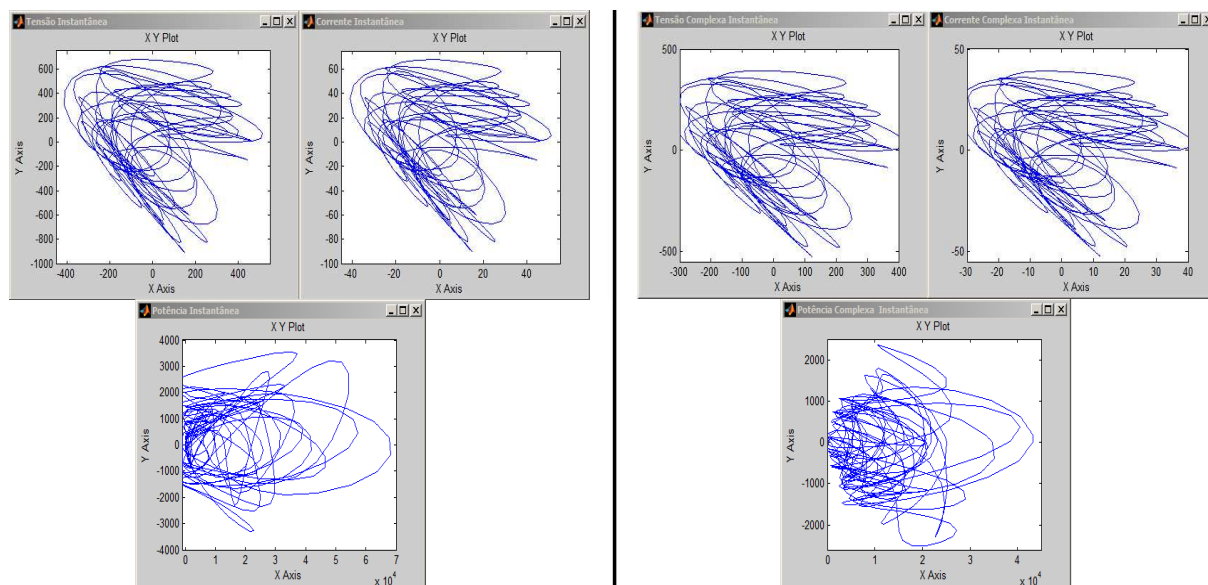


**Figura 10: Transformação inversa das correntes a serem compensadas no sistema (α-β para ABC)**

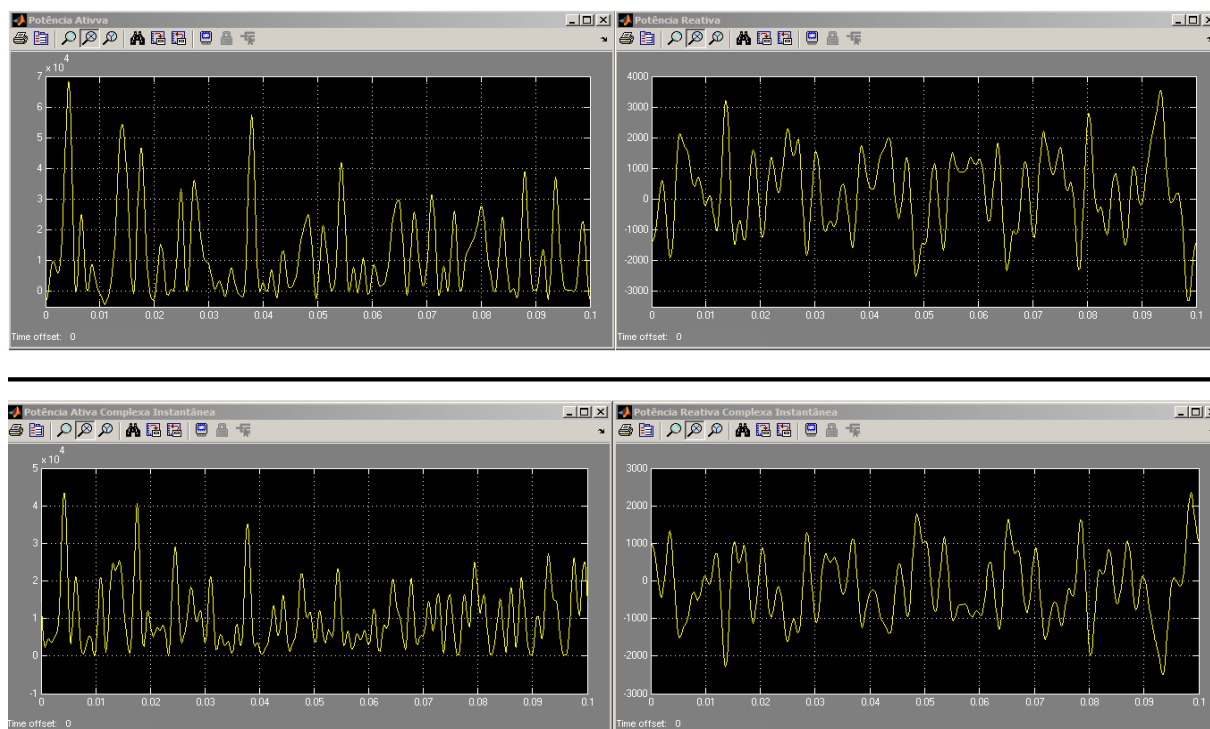


Estabelecidos os caminhos pelo quais seriam calculadas as correntes a serem utilizadas para a compensação registramos os resultados das mesmas para verificação.

A figura 11 compara os resultados obtidos em ambas as teorias para tensão, corrente e potência, trifásicas. Observando os gráficos notamos que tanto tensão quanto corrente possui mesmo traçado, com única ressalva suas amplitudes, crê-se que isso ocorra devido a forma de transformação do sistema ABC para  $\alpha$ - $\beta$ , conforme pode ser verificado nas equações 1 e 4. Na potência vê-se uma diferença tanto de amplitude quanto de forma, isso também provavelmente ocorra devido a forma de transformação do sistema, entretanto ainda não definimos, realmente, o porque tal diferença.



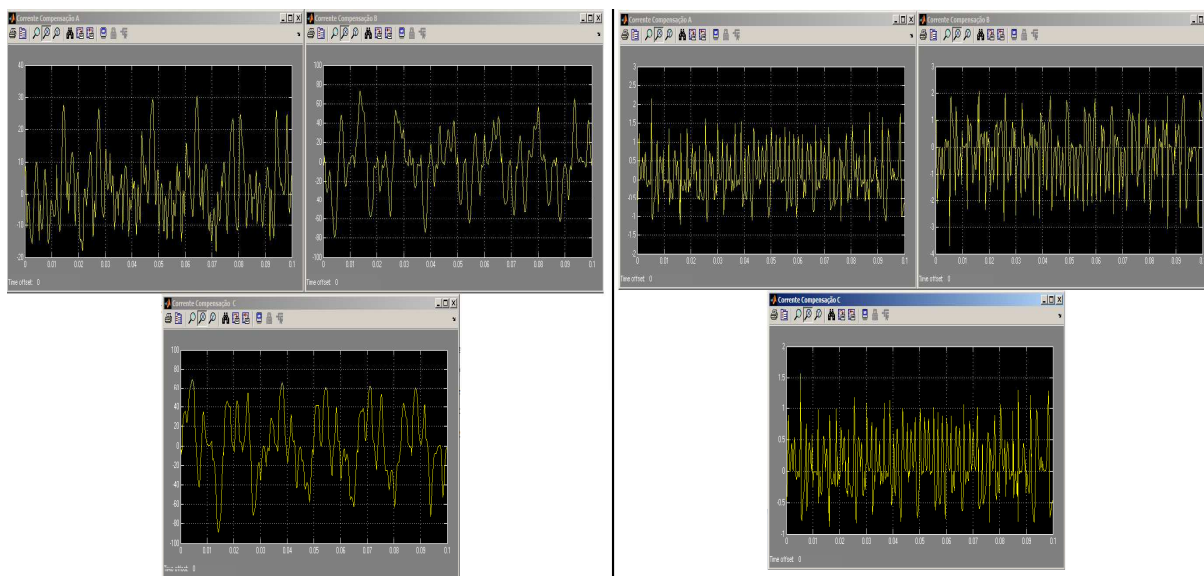
**Figura 11: Comparação das: Tensões, Corrente e Potência Total – Teoria P-Q(esq.) e TPCI(dir.)**



**Figura 12: Comparação das potências ativa(esq.) e reativa(dir.) – Teoria P-Q(acima) e TPCI(abaixo)**

A figura 12, acima, demonstra as componentes da potência trifásica, ou seja, ativa e reativa. A leitura da potência ativa é muito parecida, variando um pouco as amplitudes, já na leitura da potência reativa nota-se que os traçados estão invertidos e com amplitudes diferentes, essa inversão pode ser explicada na aquisição de dados para o cálculo da potência trifásica, pois a TPCI utiliza do conjugado do vetor corrente, assim ocasionando uma inversão do ângulo entre tensão e corrente.

A seguir, obtidos os dados de quais componentes da corrente trifásica deve corrigir foi obtido os gráficos das mesmas, conforme figura 13.



**Figura 13: Comparação correntes a serem compensadas nas fases A,B e C – Teoria P-Q(esq.) e TPCI(dir.)**

Nesta figura notamos uma grande diferença entre os resultados, inicialmente se deve ao fato de que o cálculo esteja mais completo na teoria P-Q, pois já inclui a parcela oscilante da potência ativa. Até o momento não foi possível, durante este trabalho, estabelecer tal parcela na TPCI.

Este foi o ponto final alcançado durante este trabalho, a partir daqui deve ser analisada a forma como deverão ser invertidos os sinais de corrente a serem compensados e a forma como será informado o sistema de controle do filtro. Também como será a composição do filtro ativo para aplicação das simulações.

## 5 – Conclusão

A teoria P-Q já é um trabalho bastante difundido dentro do meio de pesquisa de sistemas de potência o que facilita a obtenção de diversos trabalhos que a explanam. Já a TPCI é bem mais recente sendo difícil obter materiais mais completos e comentados sobre a mesma.

Outro ponto que se deve destacar é que as potências reativas (Teoria P-Q e TPCI) e ativa oscilante (Teoria P-Q) podem ser utilizadas em um filtro ativo de potência tanto para simulação quanto em modelos reais para a correção do fator de potência. Com ambas foi possível indentificar de forma

eficiente os valores de correntes a serem aplicadas ao sistema para que o mesmo volte a ser equilibrado e senoidal, como proposto por tais teorias.

Diante de todo o trabalho realizado até o momento podemos destacar como positivos os resultados obtidos, apesar das dificuldades encontradas durante todo o processo. Dificuldades estas que estão relacionadas a obtenção de maiores dados sobre a composição dos filtros ativos.

Encontra-se muitos artigos comentando sobre tais, entretanto não há, digamos, um modelo básico para simples estudo ou apenas para visualização ou dimensionamento dos seus componentes, aqui também entra o sistema de controle, que para este equipamento é de fundamental importância, onde todas as informações coletadas e analisadas pelo mesmo são redirecionadas ao filtro, cujo realiza a injeção na rede das corrente de correção. Devido a isso não foi possível a simulação do filtro ativo propriamente dito, mas isso não significa que o trabalho não alcançou seus objetivos, pelo contrário, agora com os resultados obtidos nas simulações acreditamos que, se elaborado e simulado, o filtro ativo e repassados esses dados ao mesmo fará a correção de forma bastante eficiente.

Vislumbrando isso a pesquisa será continuada, desta vez com foco mais teórico para a obtenção de maiores informações a cerca do sistema de controle do filtro, que conclui-se sendo o local onde nossos resultados seriam trabalhados.

Assim procuramos abrir 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.

## **6 – Perspectivas de continuidade ou desdobramento do trabalho**

Um novo projeto de pesquisa foi aprovado e visa elaborar um acervo didático sobre os filtros ativos e seus sistemas de controle a fim de propiciar, além de um banco de dados, seu uso acadêmico. Tal projeto se inicia ao final deste.

O tema envolvendo as teorias da potência instantânea é um campo ainda pouco estudado, apesar de termos um bom número de autores sobre o mesmo, pois trata de uma reformulação da análise dos sistemas de potência e com isso toda uma reestruturação do seu estudo por parte de grupos de pesquisa, estudantes dos cursos de engenharia elétrica e afins, além de engenheiros já formados.

Durante o estudo ainda 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.

## **7 – Apoio e Agradecimentos**

O projeto teve financiamento do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

## 8 – Referências Bibliográficas

- [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] WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M. "Potência Ativa e Reativa Instantânea em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas" – SBA, Rev. Controle & Automação, Vol. 3, n 1, Mar/Abr 1991.
- [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] 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.
- [7] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEEE Press, 2007. 379p.

## 9 – Bibliografia

- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, W. H. Electrical power systems quality. New York: McGraw-Hill, 1996. 256 p.
- 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.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning. IEEE Press, 2007. 379p.